



SAVONIA

Soodakattilan ilma- ja savukanavien suunnitteluohje

Lasse Hiekkala

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Hiekkala Lasse	
Työn nimi Soodakattilan ilma- ja savukanavien suunnitteluohje	
Päiväys 26.4.2012	Sivumäärä/Liitteet 45 + 2
Ohjaaja(t) Projektipäällikkö Tatu Westerholm	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) LEKA-hanke / Andritz Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin LEKA-hankkeen kautta Andritz Oy:n Varkauden yksikölle. Työn aiheena oli soodakattilan ilma- ja savukanavien suunnitteluohjeet. Ideana oli luoda yhtenäinen ja mahdollisimman helppokäyttöinen ohje, joka myös täytti standardien vaatimukset. Ohjeen tuli olla Excel-ohjelma pohjainen.</p> <p>Työssä on kuvattu ilma- ja savukanavien käyttökohteita ja selvitetty niissä vaikuttavia olosuhteita. Samalla on selvitetty miten kanavistojen eri osat vaikuttavat kanavien toimintaan ja niiden kestävyys. Työssä tutkittiin miten eri standardit vaikuttavat kanavien lujuusopilliseen mitoittamiseen ja näiden pohjalta tehtiin kanavaa koskevia lujuusopillisia mitoituksia. Lujuusopin pohjalta on selvitetty, mitkä asiat vaikuttavat kanavistojen suunnittelussa ja miten niiden mukaan mitoitukset on tehtävä.</p> <p>Työn lopputuloksina saatiin aikaiseksi Microsoft Excel-pohjainen ohje. Lopullisissa ohjeissa otetaan kantaa suorakaide- ja ympyräkanavien rakenteelliseen mitoittamiseen. Tähän kuuluu jäykisteiden profiilien mitoitus ja niiden sijoittelu kanavarakenteisiin. Myös sidetankojen käytön määrittäminen on osa työtä.</p>	
Avainsanat soodakattila, ilma- ja savukanavat, lujuusoppi	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Lasse Hiekkala			
Title of Thesis Design Manual for Air and Gas Ducts of Recovery Boilers			
Date	April 26, 2012	Pages/Appendices	45 + 2
Supervisor(s) Project Manager Tatu Westerholm			
Client Organisation/Partners LEKA-project / Andritz Ltd.			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this project was to make a new design manual for the air and gas ducts of recovery boilers. The manual was to be as simple as possible and it was also to follow standards and be excel based, if possible. This project was done for LEKA-project and Andritz Ltd. which is located in Varkaus.</p> <p>First, the location of air and gas ducts was found out and it was examined what kind of conditions there are. Different parts were also described to show which ones affect the functionality and durability of the ducts. It was also studied how different standards affect the strength of the air and gas ducts and thus the dimensions of the ducts. Then, instruction for the duct system were made.</p> <p>As a result of this project was a manual made with Microsoft Excel. The manual gives instructions for the designer on how to design rectangular and circular ducts so that they would be most efficient. This means structural calculations of the stiffeners and calculating what the preferred space between the stiffeners should be. The manual also gives instructions how to design ducts with inside rods.</p>			
Keywords recovery boiler, air and gas ducts, strength calculations			

ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty LEKA-hankkeen kautta Andritz Oy:lle ja sen tarkoituksena oli luoda kanavas suunnittelun ohjeet yrityksen käyttöön. Haluan kiittää varsinkin Andritz Oy:n Engineerin Manager Timo Lipposta ja lujuuslaskija Markku Pääkköstä hänen avusta ja ohjauksesta työn aikana. Haluan myös kiittää projektityöntekijä Mikko Huuskoa LEKA-hankkeen kautta tarjoamastaan avusta ja projektipäällikkö Tatu Westerholmia opinnäytetyön ohjauksesta. Kiitän myös perhettäni ja avopuolisoani tuesta opinnäytetyön ja koko opiskelun ajalta.

Kuopiossa 26.4.2012

Lasse Hiekkala

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
1.1	Tavoitteet ja lähtökohdat	8
1.2	LEKA-hanke	8
1.3	Andritz Oy	9
2	ILMA- JA SAVUKANAVAT	11
2.1	Kanavajärjestelmät	11
2.2	Soodakattilan ilmanpuhallusjärjestelmät	11
2.2.1	Primääri-ilmajärjestelmä	12
2.2.2	Sekundääri-ilmajärjestelmä	14
2.2.3	Tertiääri-ilmajärjestelmä	15
2.3	Soodakattilan imujärjestelmät	16
2.3.1	Laimeat hajukaasut	16
2.3.2	Savukaasujärjestelmä	16
2.4	Kanavien geometria	17
2.4.1	Ympyräkanavat	17
2.4.2	Suorakaiteen muotoiset kanavat	18
2.4.3	Kanavalevy	18
2.5	Kanavien jäykisteet	19
2.5.1	Poikittais- ja pitkittäisjäykisteet	19
2.5.2	Sisäpuoliset sideputket	21
2.6	Kanavien kannatus	21
2.7	Nostokorvake	22
2.8	Kanavien suunnitteluprosessi	22
3	SUORAKAIDEKANAVAN MITOITTAMINEN	24
3.1	Kanavalevyn mitoittaminen	24
3.1.1	Kanavalevyn pienet siirtymät	24
3.1.2	Kanavalevyn suuret siirtymät	26
3.2	Jäykisteiden mitoittaminen	27
3.3	Sideputken mitoittaminen	31
3.3.1	Sideputken vaikutus jäykisteeseen	32
3.3.2	Sideputken kestävyys	33
3.4	Kanavan nostokorvakkeen mitoittaminen	34
4	YMPYRÄKANAVAN MITOITTAMINEN	36
4.1	Kanavalevy	36

4.2 Jäykisteet.....	37
5 TYÖN TOTEUTUS.....	40
6 YHTEENVETO	42
LÄHTEET	44

LIITTEET

Liite 1 Suurten siirtymien taulukko

Liite 2 Kanavas suunnittelun ohjeet

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet ja lähtökohdat

Opinnäytetyön tavoitteena on päivittää ja uudistaa Andritz Oy:n soodakattilan ilma- ja savukanavien suunnitteluohjeita. Ennen opinnäytetyötä käytössä olleet ohjeet oli havaittu vanhentuneiksi ja lisäksi oli havaittu, että suunnittelijoilla oli käytössään omia ohjeitaan. Niinpä Andritz Oy:ssä päätettiin tarkastella kanavasuunnittelun ohjeita uudelleen ja tehdä ohjeista yhtenäiset ja standardit täyttävät. Tavoitteeksi asetettiin että ohjeiden käyttöliittymän tulisi olla Microsoft Excel -pohjainen, mahdollisimman selkeä ja yksinkertainen.

Työ alkoi jo vuoden 2011 syksyllä esiselvityshankeella, jonka tarkoituksena oli luoda hyvä pohja opinnäytetyön tekijälle, jotta hänelle olisi jo valmiina materiaalia, jonka avulla työ voisi alkaa. Opinnäytetyö tehtiin LEKA-hankkeen avulla Andritz Oy:n Varhaisen-yrityksen yksikölle.

1.2 LEKA-hanke

LEKA-hanke on Savonia-ammattikorkeakoulun hallinnoima hanke, jonka päätavoitteena on kehittää Pohjois-Savon alueella yritysten ja koulutusorganisaatioiden yhteistyötä. Se luo alueelle tutkimusyksikön ja teknologiaverkoston, jossa ammattikorkeakoulu, teknilliset yliopistot, ammattiopistot ja kehitysyhtiöt toimivat erilaisten koneenrakennukseen ja metalliteollisuuteen erikoistuneiden yritysten kanssa läheisessä yhteistyössä. Hankkeen on tarkoitus synnyttää niin tieteellistä ja soveltavaa tutkimusta kuin myös tuoda käytännön toteutusta yhteen. Samalla se tarjoaa hankkeen yhteyksien avulla uusia kontakteja kansainvälisiin tutkimuskumppaneihin. (Savonia Leka-hanke esite 2011.)

Hankkeen toiminnassa on mukana tutkijoita, yritysten henkilöstöä, opettajia sekä opiskelijoita, jotka yhdessä muodostavat keskitettyjä tutkimusyksiköitä. Hankkeen tutkimusyksiköt on hajautettu koko Pohjois-Savon alueelle ja jokaisella yksiköllä on oma tehtävänsä ja oma tutkimuksen painopisteensä. Savonia-ammattikorkeakoulun konealan painopisteitä ovat tuottavuuden kehittäminen, digitaaliset työkalut ja mene-

telmät verkostomaisessa tuotannossa elinkaariliiketoiminta huomioiden. Tämä opin-
näytetyö on osa digitaaliset työkalut -osa-aluetta. (Savonia Leka-hanke esite 2011.)

Myös muilla osatoteuttajilla on omat painotuksensa. Esimerkiksi Ylä-Savon koulutus-
kuntayhtymän Kehittämistoiminta on vastuussa oman alueensa teknologia-alan kehit-
tämisen koordinoinnista yhdessä Savonia- ammattikorkeakoulun kanssa. Se myös
vastaa Educa Works Oy:n yhteyteen sijoitettavan kehitysyksikön toiminnasta. Savon
ammatti- ja aikuisopisto taas panostaa työstökoneiden automaatiotason nostami-
seen, protopajatoimintaan sekä oman alansa koulutuksen kehittämiseen ja järjestä-
miseen. Navitas Kehitys Oy vastaa Varkauden, Pieksämäen, Joroisten ja Rantasal-
men alueiden yritysten kehittämisestä. (Savonia Leka-hanke esite 2011.)

Hankkeen on tarkoitus hyödyttää jokaista siinä toimivaa osapuolelta. Yritykset saavat
nopeasti käyttöön mittavia kehitysresursseja, joita oppilaitokset voivat tarjota. Samal-
la oppilaitokset saavat hyötyä, kun hankkeen avulla opittuja asioita voidaan käyttää
tiiviimmin opetuksessa. Tämä myös samalla luo lisäarvoa yritykselle, koska opiskeli-
jat oppivat yritykselle tarpeellisia taitoja ja näin yritykset saavat mahdollisuuden pal-
kata entistä osaavampaa työvoimaa. Pohjois-Savon alue hyötyy, kun alueen yritykset
saavat uusia kontakteja ja pysyvät kilpailukykyisinä, mikä taas antaa niille mahdolli-
suuden kasvaa. Näin alueesta tulee tunnetumpi ja kiinnostavampi kohde perustaa
uusia yrityksiä. (Savonia Leka-hanke esite 2011.)

1.3 Andritz Oy

Suomessa toimiva Andritz Oy on osana suurempaa itävaltalaisista Andritz AG-yhtiötä.
Andritz AG perustettiin jo vuonna 1852 Itävallan Graziin, ja nimensä se on saanut
kyseisen kaupungin kaupunginosan mukaan. Yritys aloitti pienenä konepajana, joka
tuotti pääasiassa pieniä ja keskisuuria valuja, joista sitten muutaman vuoden kulues-
sa laajentui nostureihin, pumppuihin ja vesiturbiineihin. Aikojen saatossa yritys on
laajentunut, ja nykyään sillä on toimintaa monella eri tekniikan alalla. (Andritz Oy
2012.)

Andritz AG on listattuna Wienin pörssiin. Sen liikevaihto oli vuonna 2009 noin 3,2
miljardia euroa sekä yrityksen tulos on ollut voitollinen vuodesta 1987. Yhtiön pääjoh-
tajana ja hallituksen puheenjohtajana toimii Dr. Wolfgang Leitner. (Hänninen 2011,
3.)

Andritz Oy:n päätuotealueet ovat puunkäsittely, kuituprosessit, kemikaalien talteenotto ja massankäsittely. Sillä on myös kaksi tytäryhtiötä, jotka ovat Savonlinna Works Oy ja Tampereella sijaitseva Andritz Hydro Oy. Savonlinna Works Oy:n päätoimialana on konepajavalmistus ja koneistus, ja Andritz Hydro Oy toimittaa järjestelmiä, laitteita ja palveluja vesivoimateollisuudelle. Andritz Oy omistaa myös puolet Varkaudessa sijaitsevasta Warkaus Works Oy:n konepajasta. Yrityksessä on noin 700 työntekijää ja toimitusjohtajana toimii Harry Rickman. (Hänninen 2011, 5.)

KR divisioonan päätarkoituksena on tarjota energiaratkaisuja sellun ja paperin tuotannon yhteyteen. Näitä ovat höyryn generaattorit ja erilaiset voimalaitokset, bioenergiajärjestelmät, haihduttimet ja soodakattilat. Muut divisioonan Suomen pisteet sijaitsevat Kotkassa ja Helsingissä. (Hänninen 2011, 5.)

2 ILMA- JA SAVUKANAVAT

2.1 Kanavajärjestelmät

Painekattiloissa on yleisemmin käytössä kahta kanavajärjestelmää, paineistettua ja tasapainotettua järjestelmää. Suuremmissa kattiloissa voi olla käytössä yhtä aikaa molemmat järjestelmät, kun taas pienemmissä laitoksissa on yleensä käytössä vain toinen järjestelmä. (Asce 1995, 8.)

Paineistetussa järjestelmässä puhaltimet pakottavat ilman läpi koko palamisjärjestelmän ja lopulta pakottaa pakokaasut ulos kattilasta. Tämä järjestelmä käyttää ylipainetta kaikissa kanavissa. Tasapainotettujärjestelmä toimii käyttäen ylipaineita ilmakehässä ja alipaineita savukanavissa. Näin saadaan ylipaineella työnnettyä ilmaa ilmakehän kautta ja alipaineella imetään savukaasut kattilasta savukanaviin. (Asce 1995, 8.)

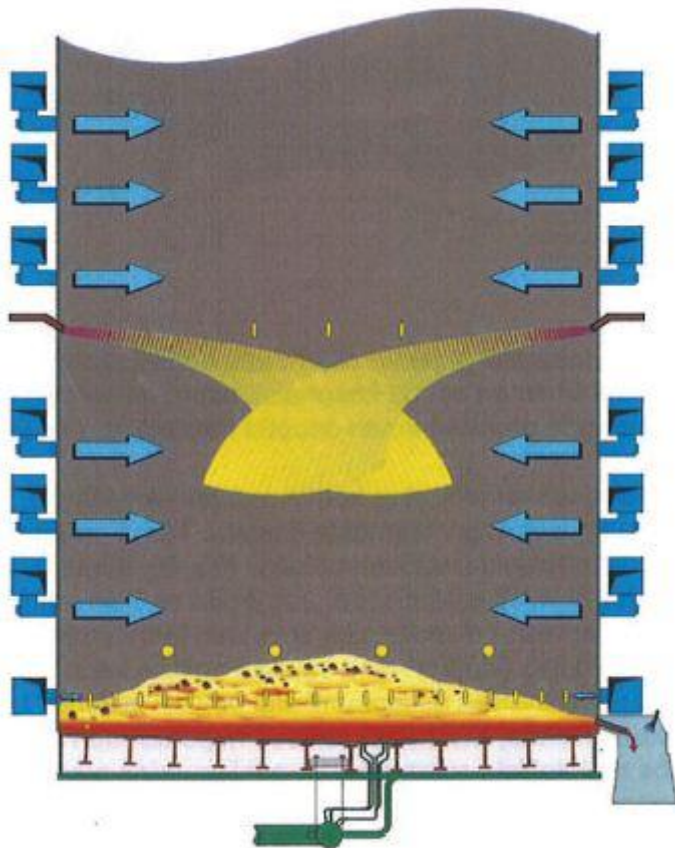
Koska on olemassa erilaisia kanavajärjestelmiä ja kanavistoja sijaitsee monessa eri paikassa kattilan kanavajärjestelmässä, voivat paineet ja lämpötilat vaihdella paikoin. Tämä asettaa vaatimuksia kanaviston rakenteelle. Kun suunnittelija tietää kyseisen kanaviston osan paineet ja lämpötilat, hän voi suunnitella käytettäviä rakenteita juuri oikein kohteen tarpeiden mukaan. Vaikka kanavien mitat olisivat samanlaiset, voidaan toisessa kohdassa käyttää ohuempaa kanavalevyä kuin toisessa, jos vaan olosuhdetiedot otetaan huomioon suunnittelussa. Eli kun koko järjestelmässä ei käytetä samaa suunnittelupainetta, saadaan aikaan kevyempiä ja optimoidumpia rakenteita. (Asce 1995, 15.)

2.2 Soodakattilan ilmanpuhallusjärjestelmät

Soodakattilan yksi käyttötarkoitus on paperitehtaan sivutuotteen, mustalipeän polttaminen. Tätä polttoprosessia säädellään erinäisillä puhallusjärjestelmillä. Jokaisella puhallusjärjestelmällä on oma tarkoituksensa palamisprosessissa. Palamiseen tarvittavaa ilmaa otetaan kattilarakennuksen yläosasta tai sitä voidaan myös imeä ulkoilmasta ja näitä voidaan myös sekoittaa keskenään. Kattilarakennuksen yläosan ilmaa ja ulkoilmaa sekoittamalla säädetään palotilaan menevän ilman lämpötilaa. Kylmissä

ilmaolosuhteissa voidaan myös käyttää ulkoilman lämmitysjärjestelmiä. (Alapuranen 2008, 43.)

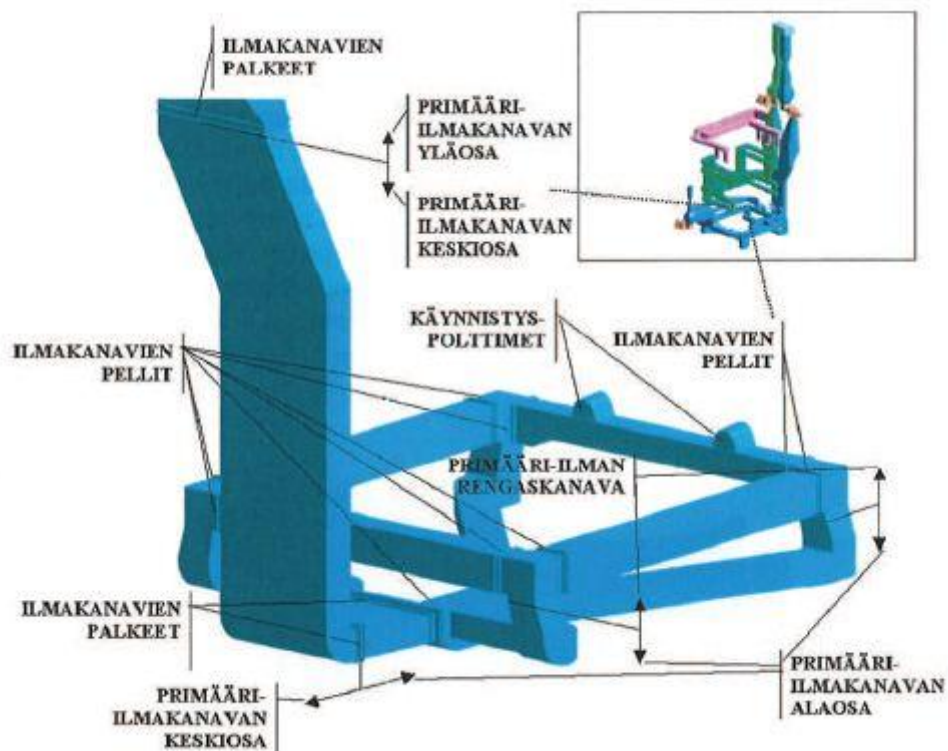
Palotilassa on käytössä kaikkiaan kolme erilaista puhallusjärjestelmää, joilla puhalletaan ilmaa kolmesta eri korkeudesta. Jokaisella puhallusjärjestelmällä on oma tehtävänsä paloprosessissa. Seuraavana on esitetty jokaisen puhallusjärjestelmän ominaispiirteitä ja tehtäviä. Soodakattilan puhallusilmajärjestelmä on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Puhallusilmajärjestelmät (Alapuranen 2008, 43.)

2.2.1 Primääri-ilmajärjestelmä

Primääri-ilmajärjestelmä sijaitsee tulipesän alaosassa ja se säätelee tulipesän alaosaan muodostuvan keon laitaosien palamista. Primääri-ilma muodostaa 25–40 % käytettävästä ilmamäärästä, ja kun on kyse suurenemista kattilan kuormista, on käytössä alhaisempia ilmamääriä. Järjestelmä jakaa ilman symmetrisesti tulipesän jokaiselle nurkalle. Esimerkki primääri-ilmajärjestelmästä on esitettynä kuvassa 2. Alapuranen 2008, 44.)



KUVA 2. Primääri-ilmajärjestelmä (Alapuranen 2008, 44.)

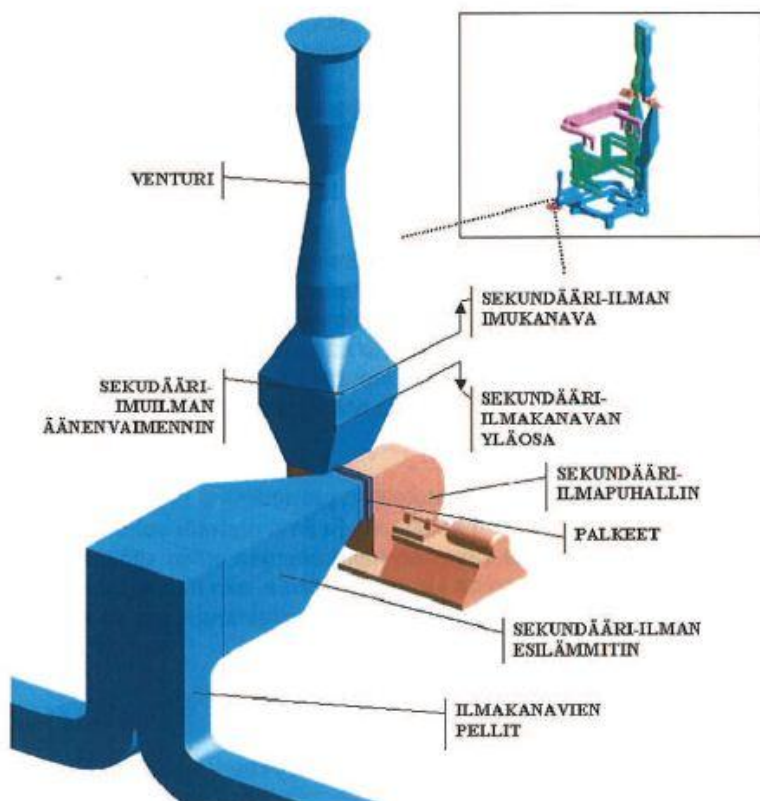
Primääri-ilmalla on tarkoitus luoda redusoiva vyöhyke tulipesän alaosaan, jonne syötetään vain osa lipeän palamiseen tarvittavasta ilmamäärästä. Näin saadaan redusoidua natriumsulfaatti (Na_2SO_4) natriumsulfidiksi (Na_2S). Syötettävän ilmamäärän on kuitenkin riitettävä palamisen ylläpitämiseen, koska liian pienellä ilmamäärällä palaminen heikkenee, mikä taas aiheuttaa keon kasvamista. Kuitenkin jos ilmamäärä on liian suuri, se jäähdyttää kekoa ja reduktioaste huononee. Samalla myös liika ilma saattaa polttaa kekoa ilma-aukkojen edestä, mikä taas voi aiheuttaa paikallisten sulalammikoiden syntymistä tulipesän pohjan laidoille. Tämä puolestaan aiheuttaa reduktioasteen laskua. Primääri-ilma esilämmitetään yleensä noin 150 asteeseen. (Alapuranen, 2008, 44; Biermann 1996, 110.)

Kun primääri-ilmanpaine saadaan säädettyä oikein ja säätöpeltien asentoa säätämällä tuotetaan oikea virtausnopeus, saadaan keko kasvamaan primääri-ilma-aukkojen alareunasta tasaisesti kohti tulipesän keskustaa. Primääri-ilman paineen käyttöalue on normaalisti 0.8 - 1.2 kPa. (Alapuranen 2008, 46.)

2.2.2 Sekundääri-ilmajärjestelmä

Sekundääri-ilmajärjestelmän päätarkoituksena on säätää tulipesän alaosaan muodostuvan keon korkeutta ja palamisen voimakkuutta, muuttamalla painetta, lämpötilaa ja ilmanmäärää muuttamalla. Järjestelmä toimii samalla tavalla kuin primääri-ilmajärjestelmä, eli ilma jaetaan kaikille seinille. Sekundääri-ilmajärjestelmä sijaitsee noin 2 metriä primääri-ilmajärjestelmän yläpuolella (kuva 3). (Alapuranen 2008, 47; Biermann 1996, 111.)

Sekundääri-ilma on 45–50 % kattilan kokonaisilmamäärästä. Alhaisempaa ilmaosuutta käytetään, kun kuorma on suuri tai kun tertiääri-ilman osuus on suuri. Jos ilman osuus on pieni, tulipesä ei saa tarvittavaa ilmaa ja palamisreaktio siirtyy tulipesän yläosaan, kun taas suurella ilmamäärällä ei ehdi kulua palamiseen ennen tertiääri-ilmatasoa ja se jäähdyttää palamisreaktiota. Samalla kaasumäärä voi nostaa lipeää kaasun mukana kattilan yläosiin, mikä taas aiheuttaa ongelmia kattilan muissa osissa. (Alapuranen 2008, 47.)



KUVA 3. Sekundääri-ilmajärjestelmä (Alapuranen 2008, 47.)

Sekundääri-ilman on tunkeuduttava kattilan keskellä, joten järjestelmässä käytetään suurempia paineita kuin primääri-ilmajärjestelmässä. Järjestelmän paineen normaali-käyttöalue on 3,5 – 5 kPa. Kun paine on säädetty oikein, ilma- ja savukaasut sekoit-tuvat tehokkaasti ja saadaan aikaan voimakas palaminen tulipesän alaosassa. Näin säädetään keon korkeus oikeaksi ja tulipesän huippu saadaan sijaitsemaan pesän keskelle ja sekundääri-ilmatason alapuolella. Kuumiin vyöhykkeeseen sijaitsee tässä tapauk-sessa sekundääri-ilmatason ja lipeäruiskutason välissä. (Alapuranen 2008, 48.)

Ilman lämpötilalla on myös oma vaikutuksensa keon palamiseen, joten sekundääri-ilmaa esilämmitetään ennen syöttämistä palotilaa. Kuitenkin jos on käytössä korkea-tasoista kuiva-ainetta, ilman lämpötilalla on pienempi vaikutus keon jäähtymiseen. Lämpötilan säätämällä on myös mahdollista luoda korkeampia paineita, eli kun kuuma ilma laajenee se luo suurempia paineita. (Alapuranen 2008, 48.)

2.2.3 Tertiääri-ilmajärjestelmä

Tertiääri-ilman päätarkoituksena on saattaa palamisprosessi loppuun asti ja samalla säätää savukaasujen happipitoisuutta. Eli voidaan sanoa, että tertiääri-ilma luo hape-tusvyöhykkeen, joka viimeistelee alemmien pelkistysvyöhykkeen palamisreaktion. Järjestelmän ilmamäärä on noin 0 - 30 % kokonaisilmamäärästä. Ilmataso otetaan käyttöön vasta, kun kattilan kuormitus on noin 70 % ja jos kuormat ovat suuria, il-manosuus nostetaan 15 - 30 %:iin. Tertiääri-ilmaa syötetään tulipesään etu- ja taka-seinältä ja vertikaali-ilmajärjestelmässä sitä syötetään useammasta eritasosta. (Ala-puranen 2008, 50.)

Tertiääri-ilman on tarkoitus sekoittaa palamisilma ja palavat kaasut niin, että polttoai-ne saataisiin poltettua loppuun asti. Tätä säädellään palamisilman nopeutta säätä-mällä, eli ilman on oltava tarpeeksi nopea, jotta ilman ja kaasujen sekoittuminen ta-pahtuu. Samalla järjestelmässä on tarpeen käyttää suurempia paineita kuin alemmis-sa ilmajärjestelmissä. Normaali paine-alue on 4.5 - 6 kPa. (Huhtinen et. al. 2008, 72; Alapuranen 2008, 50.)

Tulipesän toimintaan ei tertiääri-ilman lämmöllä ole vaikutusta, joten sitä ei ole tarpeen lämmittää ennen syöttämistä tulipesään. Kuitenkin jos tavoitteena on korkea sähköntuotanto, lämmitetään tertiääri-ilma yleensä saman lämpöiseksi kuin muut tulipesään syötettävät ilmat. (Alapuranen 2008, 50.)

2.3 Soodakattilan imujärjestelmät

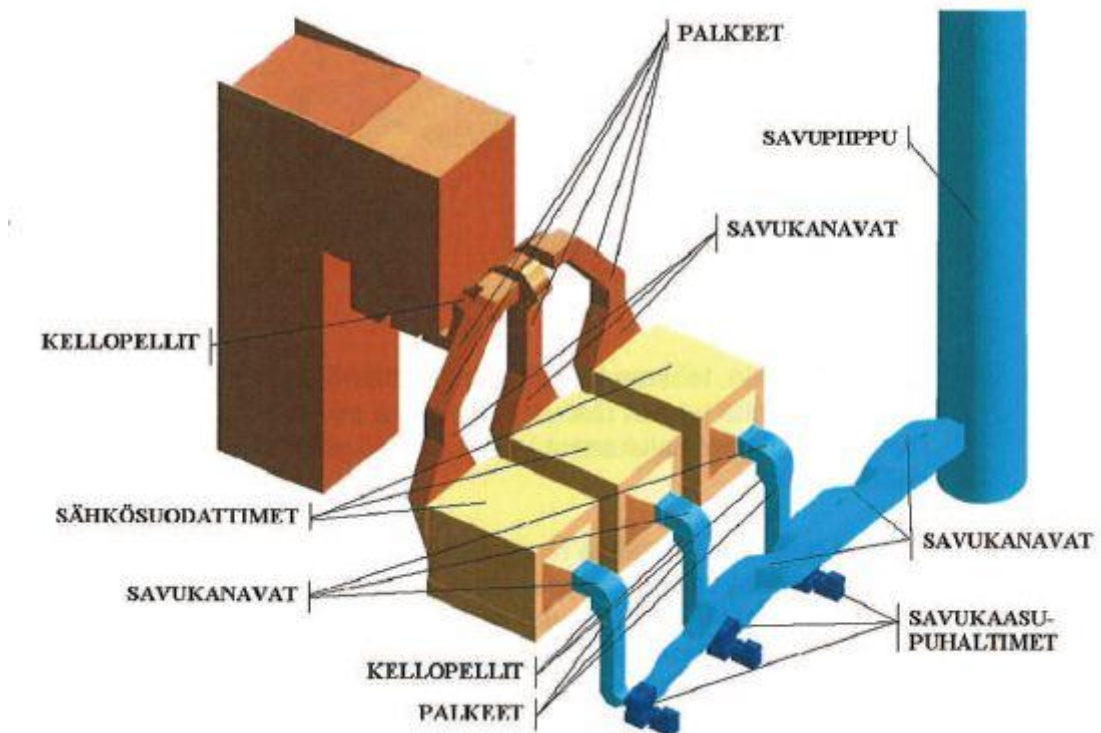
Soodakattilan toimintaan liittyvät myös oleellisesti erilaiset imujärjestelmät, joita on esitelty seuraavissa luvuissa.

2.3.1 Laimeat hajukaasut

Paperitehtaat tuottavat sivutuotteena myös kylläisiä rikkivety-yhdisteisiä hajukaasuja, jotka johdetaan nykyään soodakattilan poltettavaksi. Hajukaasut ovat suurimmaksi osaksi vain happea ja niissä on hyvin vähän palavia yhdisteitä, joten ne voidaan luokitella palamisilmaksi. Kuitenkin kaasut sisältävät huomattavasti kosteutta, joten ne on esilämmitetty ennen sekundääri- tai tertiääri-ilmajärjestelmiin syöttämistä. Hajukaasut voidaan jättää myös käyttämättä, kun kattilan kuorma on alhainen, tällöin ne ohjataan piipun kautta pois. (Alapuranen 2008, 52.)

2.3.2 Savukaasujärjestelmä

Savukaasujärjestelmän tarkoituksena on ohjata tulipesästä tulevat kaasut savupiipuun ja ulkoilmaan. Järjestelmä ohjaa kaasut ensin tulistimille ja tämän jälkeen keittoputkistoon. Keittoputkiston jälkeen ne ohjataan tyhjää solaa pitkin ekonomaiseriin, josta ne ohjataan sähkösuodattimelle. Sähkösuodatin poistaa savukaasuista kiintoaineksen eli lentotuhkan. Lentotuhka on poistettava, koska sulana se muodostaa lämpöpinnoilla kerrostumia, joita on vaikea poistaa. Kun lentotuhka on saatu eroteltua, se johdatetaan sähkösuodattimesta sekoitussäilöön ja siitä polttoliipeän kanssa takaisin kattilaan. Lopuksi kaasut pääsevät savupiipun kautta ulkoilmaan. Savukaasujärjestelmä on esitetty kuvassa 4. (Alapuranen 2008, 52; Huhtinen et. al. 2008, 72 - 74.)



KUVA 4. Savukaasujärjestelmä (Alapuranen 2008, 52)

2.4 Kanavien geometria

Yleisimmin käytettyjä kanavia ovat ympyrän ja suorakaiteen muotoiset kanavat. Kanavan muodon valintaa vaikuttavat tarvittava virtausnopeus, rakenteen vaatimukset, käytettävissä oleva tila ja hinta.

2.4.1 Ympyräkanavat

Ympyräkanavien etuna voidaan pitää sitä, että niitä ei tarvitse jäykistää niin paljon kuin suorakaiteen muotoisia kanavia. Mikä toimii varsin hyvin pienillä halkaisijoilla, mutta samalla voi aiheutua ongelmia, kun on kyseessä suuremman halkaisijan kanavat. Mikä johtuu siitä, että suurien halkaisijoiden kanavien valmistus, kuljetus ja pysyttäminen voivat aiheutua ongelmaksi. Kuitenkin, kun kanavien sisällä on suuria ylipaineita, on ympyrän muotoinen kanava paljon taloudellisempi kuin suorakaiteen muotoinen. Vasta alipaineistettuna alkavat ongelmat, kun kanavat voivat lommahtaa. (Asce 1995, 66.)

2.4.2 Suorakaiteen muotoiset kanavat

Suorakaidekanavat valmistetaan yleensä levyistä hitsaamalla, joten näin voidaan valmistaa suurempia halkaisijoita kuin ympyräkanavilla. Myös jäykisteiden käyttö on helpompaa suorakaidekanavassa, koska sitä voidaan vahvistaa useammalla jäykisteprofiililla. Tämä mahdollistaa myös suuret jäykistevälit, ja joita on helpompi muuttaa eri jäykisteiden vaikutusten mukaan. Suorakaidekanavia käytetään myös silloin, kun järjestelmä vaatii liitoksia ja ympyränmuotoista kanavan liitosta on vaikeampi suunnitella kuin liitoksia suorakaidekanavien välillä. (Asce 1995, 67.)

2.4.3 Kanavalevy

Kanavalevyä voidaan pitää ehkä tärkeimpänä kanavan osana, koska siihen kohdistuvat suurimmat rasitukset. Rasituksia ovat esimerkiksi kanavan sisällä olevat paineet ja muut ulkoiset kuormat. Kuitenkaan kanavalevyyn kohdistuvat kuormat eivät ole ainoa määräävä tekijä, suunnittelussa on myös otettava huomioon olosuhteet.

Kanavan sisällä oleva paineen lisäksi on otettava huomioon missä lämpötilassa kanavat sijaitsevat, koska kanavassa käytettävien materiaalien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan noustessa. Esimerkiksi jos kanavalevyn materiaalina on teräs, laskee sen myötölujuus lämpötilan noustessa ja samalla tavalla käy myös materiaalin kimmokerroimen kanssa. Materiaalin valinta tulee tärkeään rooliin kun lämpötilat alkavat noustamaan. Korkeimmissa lämpötiloissa voidaan käyttää kuumalujia materiaaleja ja näin ei ole tarpeen lisätä kanavalevyn seinämävahvuutta.

Kanavalevyn seinämävahvuus on kuitenkin hyvin tärkeässä roolissa kanavan kestävyteen, sitä muuttamalla voidaan vähentää jäykisteiden tarvetta. Kuitenkin on otettava huomioon, että seinämävahvuuden lisäys voi myös tehdä huomattavia lisäyksiä rakenteiden painoon, joten jossain tapauksissa se ei ole taloudellinen vaihtoehto. Näissä tapauksissa on järkevämpi pienentää jäykistevälejä tai lisätä jäykisteiden kokoa.

Kun on kyseessä savukanavat voivat ongelmaksi muodostua myös korrodioivat ainesosat, kuten tuhka ja muut epäpuhtaudet. Näiden vaikutuksia voidaan estää tai ehkäistä käyttämällä erilaisia pintakäsittelyjä tai lisäämällä kanavalevyyn korrosiova-
raa.

2.5 Kanavien jäykisteet

Kanavalevyjä jäykistetään, jotta niiden levyjen vahvuutta voidaan vähentää, näin saadaan tiputettua materiaalien painoa ja kanavat voidaan rakentaa kevyinä rakenteina. Samalla voidaan kanavia jäykistämällä, estää etteivät kanavan levypinnat kas-
va liian suuriksi. Jäykisteet myös vähentävät mahdollisia levyjen värähtelyjä. Joissain tapauksissa kanavia ei ole tarpeen jäykistää lujuudellisista syistä, mutta jäykisteet ovat tarpeellisia helpottamaan kuljetuksia ja estämään niistä aiheutuvia muodonmuu-
toksia. (Asce 1995, 176.)

Koska rakenteiden oma paino pysyy suhteessa pienenä, vaikuttaa rakenteeseen kohdistuva ulkoinen kuorma yleensä määräävästi. Näitä kuormia kanavissa ovat yleensä sen sisällä vaikuttava yli- tai alipaine.

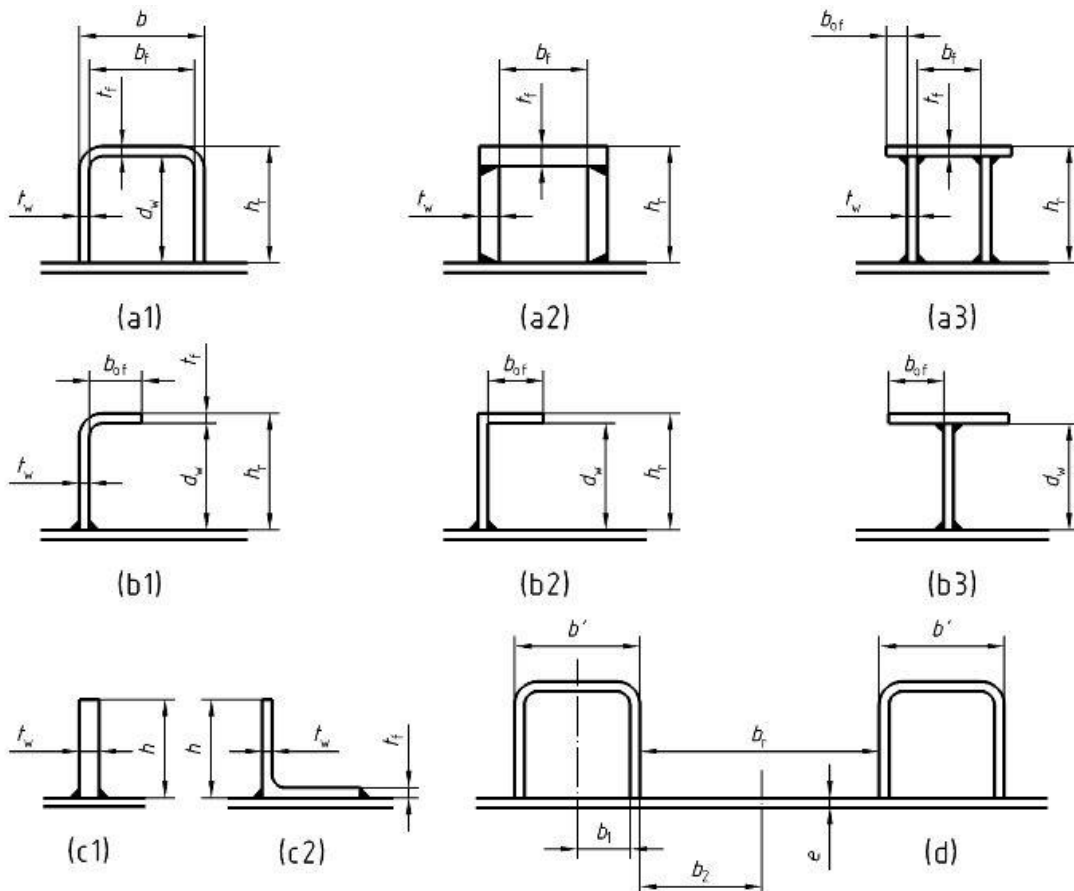
Kanavissa on käytössä useampaa erilaista jäykistystapaa esimerkiksi, poikittais- ja pitkittäisjäykisteitä ja sisäpuolisia sidetankoja. Jäykisteet asennetaan yleensä kana-
van ulkopinnalle, näin pidetään huoli, ettei jäykisteistä aiheudu häiriöitä kanavan vir-
tauksiin. Kuitenkin jos jäykisteet on asennettava kanavan sisäpuolelle, on suunnitte-
lussa otettava huomioon, ettei liian suuria painehäviöitä pääse tapahtumaan. Eri-
tyyppisiä jäykisteitä on esitelty seuraavissa kappaleissa.

2.5.1 Poikittais- ja pitkittäisjäykisteet

Poikittaisjäykisteitä käytetään hyvin yleisesti niin suorakaiteen kuin ympyrän muotoi-
sissa kanavissa, näitä voidaan luultavimmin pitää yleisimpänä jäykistystapana. Poi-
kittaisjäykisteet asennetaan yleensä tasaisin välein, jotta saadaan luotua kanavale-
vyille samankokoisia pintoja. Näin saadaan luotua tasaiset rasitukset koko kanavan
alueelle ja samalla sillä helpotetaan kanavan eristämistä. (Asce 1995, 176.)

Pitkittäisjäykisteet tulevat kysymykseen kun huomataan, että poikittaiset joudutaan asentamaan hyvin pienellä jäykistevälillä. Näissä tapauksissa pitkittäisjäykisteillä saadaan pudotettua rakenteiden painoa ja pystytään vähentämään jäykisteiden käyttöä. Kuitenkin kun käytetään pitkittäisjäykistettä, joudutaan käyttämään myös poikittaisia tietyin välimatkoin. Pitkittäiset jäykisteet voivat kuitenkin luoda ongelmia niiden sijoittelun kanssa, joten niitäkään ei ole mahdollista asettaa aina kanavaan. Jos kanava joudutaan jäykistämään sisältä, asennetaan siihen yleensä pitkittäiset jäykisteet, koska näin saadaan vähennettyä virtaushäviötä kanavassa. (Asce 1995, 177.)

Erilaisia käytössä olevia jäykisteprofiileja on esitetty kuvassa 5. Yleisesti pyritään käyttämään latta-profiilin jäykistettä niiden keveyden takia, nämä on esitetty kuvan 5 kohdassa (c1). Muita yleisesti käytettyjä profiileja on L-profiili kuvassa 5 kohdassa (b2) ja U-profiili kuvassa 5 kohdassa (a1). Näitä profiileja käytetään kun halutaan lisätä jäykisteväliä tai rasisus on kasvanut liian suureksi latta-profiilin jäykisteelle. Kuitenkin kun jäykistystä suunnitellaan, on otettava huomioon, ettei jäykisteiden korkeus kasva liian suureksi, koska tämä voi aiheuttaa ongelmia kanavan eristämisessä.



KUVA 5. Jäykisteprofiileja (SFS EN-13445-3 2009, 326.)

2.5.2 Sisäpuoliset sideputket

Sisäpuolisia sideputkia käytetään yleisesti poikittaisjäykisteiden kanssa ja ne asennetaan yleensä juuri näiden jäykisteiden kohdalle. Sideputkia siirrytään käyttämään, kun huomataan, että jäykisteiden koot alkavat kasvaa suuriksi ja on tarpeen pienentää jäykisteiden kokoa. Näin saadaan vähennettyä rakenteiden painoa. Sideputkilla on myös suuri vaikutus silloin, kun kanavan sisällä on alipaineita, joka voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa kanavalevyn lommahduksen.

Osana opinnäytetyötä oli myös selvittää sideputken vaikutus jäykisteeseen kohdistuvaan rasitukseen.

2.6 Kanavien kannatus

Kanavien kannatuksen ohjeiden tarkasteluun voidaan käyttää esimerkiksi putkistostandardia SFS 5361, joka antaa ohjeita siihen, miten putkiston kannattamisen kanssa tulisi toimia. Kanavat ovat analogisia putkistojen kanssa, mutta niiden suunnittelu on yleensä yksinkertaisempaa.

Kanavien kannatuksen ensisijainen tarkoitus on jakaa painokuormaa kannatuspisteille. Samalla kannatuksella säädellään kanavan liikkeitä ja heilumista sekä vaimennetaan mahdollista värähtelyä. Kannatuksella voi olla vaikutusta myös kanavien jäykistämiseen, koska joskus on asennettava lisäjäykisteitä, jotta kannakkeet saadaan asennettua tukevasti kanaviin. (SFS 5361 2007, 4.)

Kanavan oma kuorma on tärkein kannakkeeseen aiheutuva kuormitus; kanavan sisäisellä paineella ei ole suurempaa vaikutusta kannatusten kestävyYTEEN. Kuitenkin mahdolliset paineen vaihtelut on otettava huomioon kannatusten suunnittelussa. Tämä johtuu siitä, että kannakkeiden on kestettävä ja vaimennettava mahdollisia paineiskuja. Muita kanavien kannatukseen vaikuttavia tekijöitä ovat mahdolliset tuuli-, lumi tai muut ulkoiset kuormat. (SFS 5361 2007, 4.)

2.7 Nostokorvake

Nostokorvakkeet kuuluvat määräyksiensä puolesta nostoapuvälineisiin. Nostoapuvälineitä ovat komponentit tai laitteet, jotka eivät ole pysyvästi kiinni nostolaitteessa. Nostolaite nostaa kuorman apuvälineen avulla niin, että apuväline on kiinni kuormassa tai niin että sitä käytetään taakan ja nostolaitteen välissä. (Työsuojeluhallinto 2008, 8.)

Nostokorvakkeet mitoitetaan niihin kohdistuvan kuorman mukaan. Mitoituksessa on otettava huomioon se, että taakka ei välttämättä jakaudu symmetrisesti kaikille korvakkeille. On huomioitava, että taakka itse kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Nostokorvakkeisiin merkitään aina suurin sallittu kuorma, eikä sitä saa missään tapauksessa ylittää. (Työsuojeluhallinto 2008, 29.)

Nostokorvakkeiden nostamiseen käytetään sakkeleita (kuva 6), joiden tulee olla nostotarkoitukseen suunniteltuja. Sakkelit ovat irtonaisia nostotarvikkeita, joihin on merkitty suurin sallittu kuorma. (Työsuojeluhallinto 2008, 30.)

Kun suunnitellaan ilmakeinien nostopaikkoja, tärkein asia on kanavan aiheuttama paino, koska se määrää, miten suurin välein nostokorvakkeita voidaan asettaa. On otettava huomioon, ettei yhdelle nostokorvakkeelle tule liian suurta massaa kannatettavaksi. Korvakkeiden väleihin vaikuttavat myös ilmakeinien taipumat ja niiden oman painon aiheuttama jännitys. Tästä syystä on otettava huomioon, ettei kanavan oma paino aiheuta liian suurta jännitystä rakenteelle tai etteivät rakenteen muodonmuutokset ole niin suuria, että niistä olisi haittaa rakenteen kestävyydelle.



KUVA 6. Sakkeli (Työsuojeluhallinto 2008, 30.)

2.8 Kanavien suunnitteluprosessi

Järjestelmässä tulisi ottaa huomioon, että kanavien aiheuttamat kustannukset saataisiin minimoitua ja rakenne olisi optimoitu mahdollisimman yksinkertaiseksi. Tämä

tarkoittaa sitä, että kanavat saisi rakennettua niin, että ne olisivat mahdollisimman lyhyitä, mikä taas vähentäisi kanavissa muodostuvia painehäviöitä. Tällä saataisiin myös vähennettyä rakenteiden painoa. Yleensä suunnittelussa joudutaan kuitenkin tekemään kompromisseja juuri ilmanvirtauksen ja lujuusteknisten vaatimusten kanssa. (Asce 1995, 36.)

Tyypillinen suunnitteluprosessi alkaa virtausdiagrammin laadinnalla. Virtausdiagrammissa esitetään kanaviston ilman ja kaasujen reittejä kattilan tarpeiden mukaan. Tämän jälkeen tutkitaan, minkälaisia virtauksia, paineita ja lämpötiloja kanaviston eri osiin muodostuu. Näiden mukaan muodostetaan kanavien mitat. (Asce 1995, 36.)

Kanavien mitoissa suurin ratkaiseva tekijä on tarvittavat virtausnopeudet, jotka määrittelevät kanavien koot. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi tilan tarve ja muiden laitteistoiden asennustarpeet. On myös otettava huomioon kanavien kuljetettavuus ja nostokohdat. Kanaviston rakenteessa otetaan huomioon myös mahdolliset liitokset ja huoltoaukot. (Asce 1995, 36-37.)

Kun kanaviston rakenne on valmiina, on suunnittelijan otettava huomioon myös lujuusopilliset vaatimukset. Näihin kuuluu esimerkiksi jäykisteiden sijoittelu, sidetankojen sijoittelu ja kanaviston tuentaan vaikuttavat tekijät. Kun lujuustekniset vaatimukset on otettu huomioon, on tarkastettava, että kanava täyttää tarvittavat virtausnopeudet, koska sisäpuoliset jäykisteet voivat lisätä painehäviöitä. (Asce 1995, 37.)

Koska kanavat ovat kytköksissä erilaisiin puhaltimiin, on otettava huomioon, etteivät nämä laitteistot aiheuta kanaviin resonanssia. Tätä voidaan estää esimerkiksi asettamalla tarvittaviin kohtiin palkeita, jotka vaimentavat värähtelyjä kanavan osien välillä. Samalla värähtelyjä estetään eristämällä myös kanavien ulkopinnat. (Asce 1995, 38.)

3 SUORAKAIDEKANAVAN MITOITTAMINEN

Suurin osa kanavan mitoittamisesta perustuu Eurocode-standardeihin. Eurocode-standardit ovat rakennesuunnittelun ohjeistuksia, jotka on rakennettu eri alojen tarpeita silmällä pitäen.

3.1 Kanavalevyn mitoittaminen

Suorakaidekanavissa kanavalevy on luultavasti tärkein kanavan osa. Jotta se kuitenkin olisi taloudellinen, on sitäkin jäykistettävä. Kanavalevy itsessään kantaa siihen aiheutuvaa ulkoista tai sisäistä painetta. Kun kanaville suunnitellaan jäykistevälejä, pitää ottaa huomioon, ettei kanavalevyn koko pääse kasvamaan liian suureksi. Koska mitä suuremmaksi levykoko kasvaa, sitä suuremmat ovat jännitykset levyn reunassa ja levyyn aiheutuvat muodonmuutokset. Näitä aiheutuu levyyn kohdistuvista paineista tai muista ulkoisista voimista; myös levyn omalla painolla on vaikutusta. (Asce 1995, 132.)

Kanavalevyn rasituksia laskettaessa ajatellaan, että jäykisteväli ja kanavan leveämpi sivu muodostavat levypinnan. Levypintana pidetään sellaista pintaa, jonka ainevahvuus on joka kohdassa sama ja joka on homogeenistä isotrooppista materiaalia (Young & Budynas 2002, 428). Kanavalevyn laskennassa ajatellaan, että levypinta on jäykästi kiinnitettynä jokaisesta nurkasta ja siihen vaikuttaa tasaisesti jakaantunut kuorma.

3.1.1 Kanavalevyn pienet siirtymät

Pienten siirtymien teoriaa voidaan pitää yksinkertaistettuna versiona kanavalevyn suunnitteluun ja siihen kohdistuvien rasitusten tarkasteluun. Kuitenkin on mahdollista myös tarkastella levypintaa suurten siirtymien teorialla, joka on esitettyinä luvussa 3.1.2. (Asce 1995, 136.)

Kun kanavalle lasketaan jäykistysväliä, on otettava huomioon kanavalevyyn aiheutuva paine ja se miten se vaikuttaa levyn reunajännityksiin ja taipumaan. Levypinnan maksimijännitys σ sijaitsee levyn pidemmän sivun a nurkassa, ja se voidaan laskea Tekniikan taulukkokirjan tapauksen 14. mukaan kaavalla,

$$\sigma = \frac{-C_1 * p * b^2}{t^2}, \quad (3.1)$$

jossa kerroin C_1 saadaan taulukosta 1, kun lasketaan pidemmän sivun ja lyhyemmän sivun b suhde. t on levyn paksuus. (Valtanen 2012, 433, 438.)

Taulukkokirja antaa myös kaavan keskellä levyä olevalle jännitykselle, mutta koska se ei ole määräävässä osassa, voidaan se jättää tässä tapauksessa laskematta. Maksimijännitystä verrataan kyseessä olevan materiaalille annettuun sallittuun myötörajaan. Jos maksimijännitys jää myötörajan alapuolelle, voidaan ajatella, että levy kestää siihen kohdistetun paineen.

Koska levyn kestävyys riippuu myös levyn maksimitaipumasta δ , on sekin laskettava. Taipuma voidaan lasketa taulukkokirjan antamalla kaavalla

$$\delta = \frac{C_3 * p * b^4}{E * t^3}, \quad (3.2)$$

jossa kerroin C_3 saadaan sivujen suhteen mukaan katsottua taulukosta 1. Symbolilla E tarkoitetaan käytettävän materiaalin kimmokerrointa ja esimerkiksi kun on kyseessä rakenneteräs huoneenlämmössä, voidaan käyttää arvoa 210 GPa. Kaavasta saatua maksimitaipumaa verrataan levyn pidemmän sivun mukaan laskettuun sallittuun taipumaan, jos taipuma jää alle sallitun, voidaan ajatella että levypinta kestää siihen kohdistetun paineen. (Valtanen 2012, 438.)

Näiden kahden kaavan avulla voidaan mitoittaa levyille maksimitat ja se myös auttaa kanavalle valittavan jäykisteen valintaa.

TAULUKKO 1. Levyn kertoimet (Valtanen 2012, 438.)

a/b	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2+
C_1	0,3078	0,3834	0,4356	0,4680	0,4872	0,4972	0,500
C_2	0,1380	0,1790	0,2094	0,2286	0,2406	0,2472	0,2500
C_3	0,0138	0,0188	0,0226	0,0251	0,0267	0,0277	0,0284

3.1.2 Kanavalevyn suuret siirtymät

Kun levyn pinnan rasitukset alkavat kasvaa, myös muodonmuutokset kasvavat ja kun taipuma alkaa olla suurempi kuin noin puolet levyn paksuudesta, voi levyä alkaa tarkastella suurten siirtymien teorialla. Suurten siirtymien teoria ottaa huomioon sen, että levyyn muodostuva kalvojännitys alkaa kantaa osan kuormasta. Kun näin käy, on levy jäykempi kuin pienten siirtymien teoria antaa olettaa. Näissä tapauksissa ei ole enää kyseessä lineaarinen analyysi vaan levy käyttäytyy epälineaarisesti (Young & Budynas 2002, 448.).

Kun levyä tarkastellaan suurten siirtymien teorialla, on mahdollista suurentaa jäykistävää jopa 20 % ja samalla lisätä kuormankanto kykyä jopa 30 % verrattuna pienten siirtymien teoriaan. Näissäkin tapauksissa on kuitenkin otettava huomioon, että myös jäykisteen on kestävä lisääntyneet jännitykset. (Asce 1995, 137.)

Roarks's stress and strain antaa analyyttisen ratkaisun suurien siirtymien laskemiselle, nämä kaavat ja muuttujat on esitetty liitteessä 1. Kirjan kaavojen mukaan on mahdollista laskea kuorman aiheuttamat jännitykset ja taipumat. Koska on kyseessä täysin jäykästi kiinnitetty levy, käytetään liitteen tapausta Held and fixed, jossa ensin lasketaan kerroin K_1 , jonka avulla taulukosta valitaan sopivat kertoimet jännityksen ja taipuman laskemiseen. Levypinta on esitetty kuvassa 7. Kerroin K_1 lasketaan kaavalla

$$K_1 = \frac{p \cdot b^4}{E \cdot t}, \quad (3.3)$$

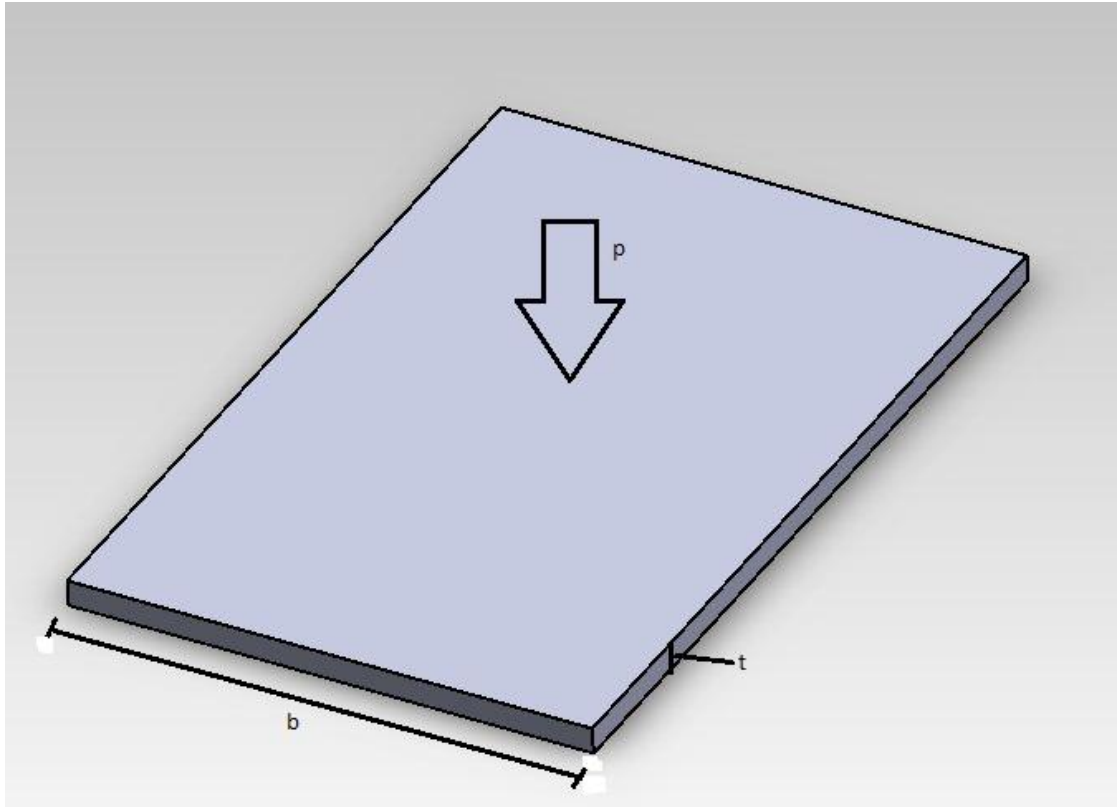
kertoimen avulla katsotaan oikea sarake liitteen 1 taulukosta ja valitaan kerroin c_1 taipumalle ja kerroin c_3 jännitykselle pidemmän sivun reunassa. Levylle aiheutuva taipuma y lasketaan kaavalla

$$y = c_1 \cdot t, \quad (3.4)$$

joka antaa taipuman arvon suoraa halutussa yksikössä. Kuorman aiheuttama maksimijännitys σ lasketaan kaavalla

$$\sigma = \frac{c_3 * E * t^2}{b^2}, \quad (3.5)$$

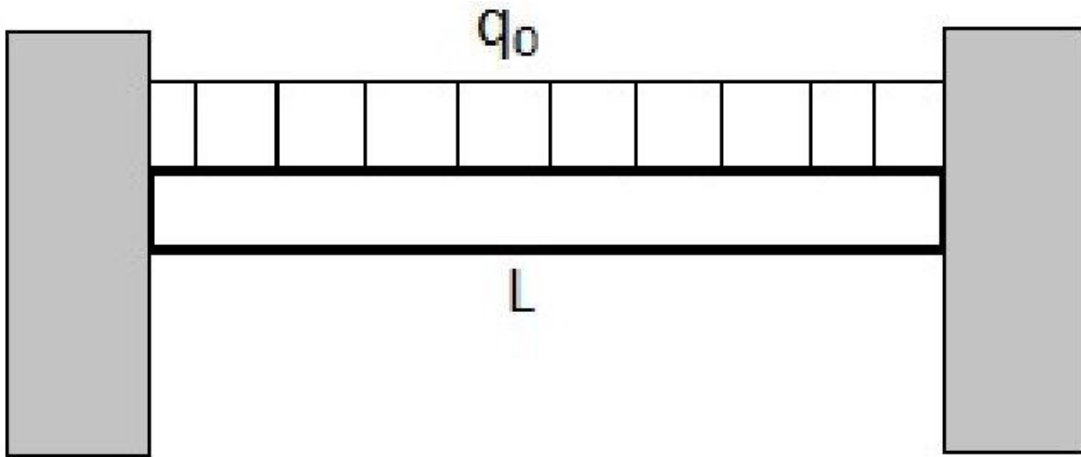
joka antaa suoran arvon oikeassa yksikössä. (Young & Budynas 2002, 452.)



KUVA 7. Esimerkki levypinnasta ja sen mitoista.

3.2 Jäykisteiden mitoittaminen

Koska kanavalevyn pinta-alaa on rajoitettava lujuudellisten syistä, on siihen järkevintä lisätä jäykisteitä. Näin saadaan ohjattua rasituksia jäykisteeseen, joten rakenteissa on mahdollista käyttää ohuempia kanavalevyjä. Kun kanavalevy on saatu mitoitettua siihen kohdistuvien rasitusten mukaan ja maksimijäykisteväli on saatu selville. On aika selvittää mitä jäykistettä on käytettävä, jotta kanava olisi mahdollisimman taloudellinen. Ensinnäkin on syytä selvittää miten jäykistettä käsitellään lujuusopillisesti.



KUVIO 8: Jäykästi tuettu palkki, johon vaikuttaa viivakuorma

Lujuusopillisesti voidaan ajatella että jäykiste toimii kanavalevyssä, kuin jäykästi tuettu palkki. Koska kanavaan vaikuttaa tasainen paine p koko sen matkalta, voidaan myös ajatella että paine aiheuttaa palkkiin tasaisen viivakuorman q_0 . Lujuusopin perusteet - kirjassa on tapaus 38, joka vastaa tällaista tilannetta (Outinen, Salmi, Vulli, 2007, 453). Kirjan antamilla kaavoilla on mahdollista selvittää tasaisen kuorman palkille aiheuttama maksimimomentti M_{max} ja maksimi taipuman v_{max} . Kuviossa 8 on esitetty tapaus 38.

Maksimimomentti saadaan laskettua kaavalla

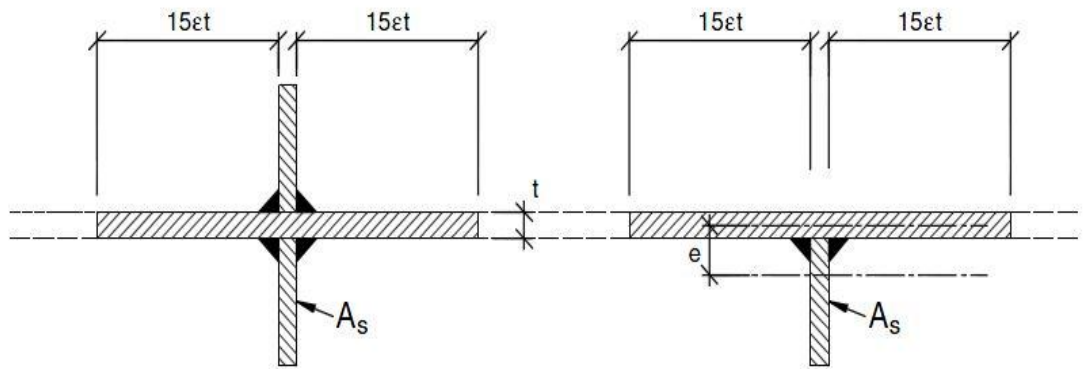
$$M_{max} = -\frac{1}{12} q_0 L^2, \quad (3.6)$$

jossa L on palkin pituus ja tässä tapauksessa myös kanavan leveämmän sivun pituus. Maksimi taipuma voidaan laskea taas kaavalla

$$v_{max} = \frac{q_0 L^4}{384 E I'}, \quad (3.7)$$

joka antaa taipuman keskellä palkkia. Koska kanavan ajatellaan että kanavan sisällä vaikuttaa tietty paine on selvitettävä paljon käytettävä paine aiheuttaa viivakuormaa. Viivakuorma selvittämiseen on määritettävä jäykisteväli a . Paineen ja jäykistevälin avulla on mahdollista selvittää viivakuorma q_0 käyttämällä kaavaa

$$q_0 = p * a. \quad (3.8)$$



KUVA 9. Jäykisteen tehollinen pinta-ala (SFS EN-1993-1-5 2006, Kuva 9.1)

Koska jäykiste ja kanavalevy muodostavat yhdistelmäprofiilin, on selvitettävä molempien pinta-alojen avulla yhdistelmäprofiilin staattinen momentti. Jäykisteen pinta-ala A_s voidaan selvittää kun tiedetään jäykisteen korkeus b_j ja paksuus t_j . Jäykisteen pinta-ala saadaan laskettua kaavalla

$$A_s = b_j * t_j. \quad (3.9)$$

Koska jäykiste voidaan ajatella vaikuttavan suuremmalla pinta-alalla kuin sen oma pinta-ala, on tärkeä mitoittaa jäykisteen tehollinen pinta-ala. Jäykisteen tehollisen pinta-alan vaikutusta on esitetty kuvassa 9.

Kuten kuvasta 9 voidaan huomata, jäykisteen tehollinen pinta-ala riippuu jäykisteen paksuudesta, kanavalevyn seinämävahvuudesta t ja kertoimesta ε , joka lasketaan kaavalla

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \quad (3.10)$$

jossa f_y on käytettävän materiaalin myötölujuus (SFS EN-1993-1-5 2006, 16). Näin saamme teholliselle leveydelle kaavan

$$b_e = 30 * \varepsilon + t, \quad (3.11)$$

jonka avulla voimme laskea kanavalevyn vaikuttavan pinta-alan A_k . Pinta-ala voidaan laskea käyttämällä kaavaa 3.9.

Koska kanavalevyn ja jäykisteen muodostama yhdistelmäprofiili ei ole täysin symmetrinen on selvitetävä sen painopiste e z-akselin suhteen. Yhdistelmäprofiilin painopisteiden paikkoja on selvennetty kuviossa 10. Painopiste voidaan laskea staattisen momentin avulla, jolloin se määritetään käyttäen kummankin profiilin painopistettä ja alaa. Painopiste voidaan määrittää kaavalla

$$e = \frac{e_k * A_k + e_j * A_s}{A_k + A_s}, \quad (3.12)$$

jossa e_k on kanavalevyn keskipiste ja e_j on jäykisteen keskipiste yhdistelmäprofiilissa, joka voidaan laskea kaavalla

$$e_j = t + \frac{b_j}{2}. \quad (3.13)$$

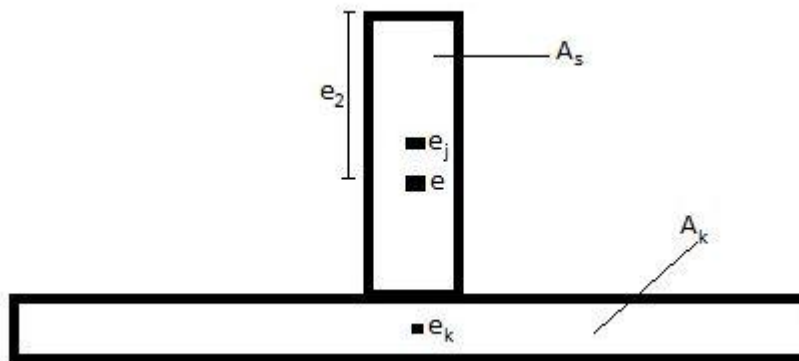
Painopisteen etäisyys jäykisteen yläreunasta e_2 voidaan selvittää kaavalla

$$e_2 = t + b_j - e. \quad (3.14)$$

Kun yhdistelmäprofiilin painopiste on selvitetty, on selvitetävä myös sen jäyhyysmomentti I_{yhd} . Koska kyseessä oleva profiili ei ole symmetrinen, on jäyhyysmomentti selvitetävä Steinerin säännön avulla.

Tässä tapauksessa yhdistelmäprofiili voidaan selvittää kaavalla

$$I_{yhd} = \frac{b_e * t^3}{12} + (e - e_k)^2 * A_k + \frac{b_j t_j}{12} + \left(\frac{b_j}{2} - e_2\right)^2 * A_j. \quad (3.15)$$



KUVIO 10. Yhdistelmäprofiilin painopisteet

Kun profiilia koskevat tiedot on laskettu, on aika määrittää, minkälaisia rasituksia suunnittelupaine aiheuttaa profiilille. Ensin on selvitettävä maksimimomentti, joka voidaan määrittää kaavalla 3.6. Maksimimomentin avulla voidaan määrittää profiiliin kohdistuvat jännitykset profiilin kummassakin päässä.

Jännitys σ_1 voidaan selvittää kaavalla

$$\sigma_1 = \frac{M_{max}}{I_{yhd}} * (-e), \quad (3.16)$$

sekä jännitys σ_2 , joka sijaitsee profiilin toisessa päässä, voidaan selvittää kaavalla

$$\sigma_2 = \frac{M_{max}}{I_{yhd}} * (-e_2). \quad (3.17)$$

Vertaamalla kahta erijännitystä saadaan selvitettyä, mikä on suunnittelupaineen profiilille aiheuttama suurin jännitys. Tätä arvoa verrataan käytettävän materiaalin sallittuun jännitykseen σ_{sall} , josta nähdään, kestääkö rakenne siihen kohdistuvan kuorman.

Kuitenkaan jännitys ei ole ainut kriittinen tekijä jäykisteen mitoituksessa. On myös määritettävä, paljonko profiili taipuu kuorman vaikutuksesta. Tämän määrittämiseen voidaan käyttää palkin taipuman määrittämiseen käytettävää kaavaa 3.7. Kaavalla saatua arvoa verrataan sallittuun taipumaan. Jos laskettu taipuma jää sallitun taipuman arvon alapuolelle, voidaan ajatella, ettei rakenteeseen aiheudu liian suuria taipumia.

Kun taipuma ja maksimijännitys on tiedossa, voidaan päätellä onko jäykiste tarpeeksi kestävä vai onko aiheellista muuttaa jäykisteprofiilia. Kestävyyttä voidaan myös parantaa esimerkiksi pienentämällä jäykisteväliä tai muuttamalla käytettävää materiaalia.

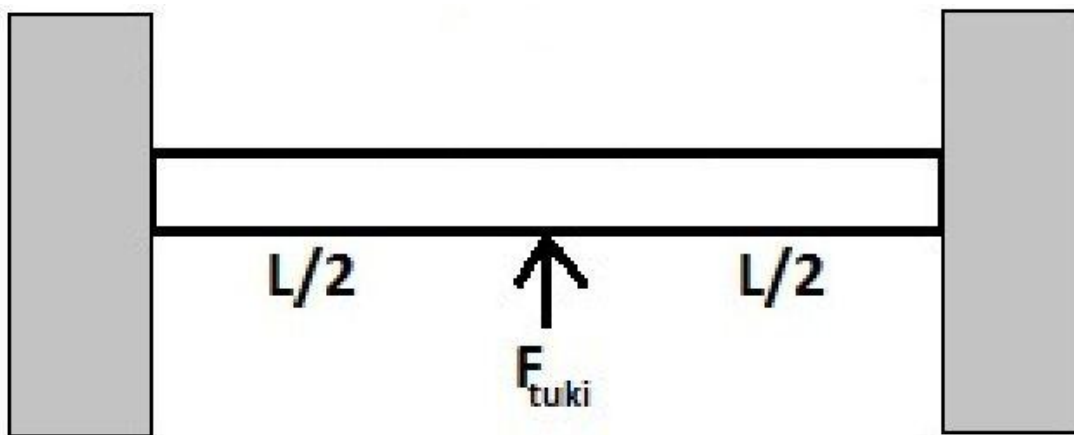
3.3 Sideputken mitoittaminen

Sideputken tarkoituksena on vähentää jäykisteeseen aiheutuvaa kuormaa ja näin mahdollistaa pienempien jäykisteiden käyttö. Sideputkia on käytössä erilaisia profiile-

ja, ja niihin vaikuttavat olosuhteet voi olla hyvinkin erilaisia. Joten on oleellista mitoitaa myös sideputki niin, että se kestää paineen aiheuttaman rasituksen. Kanavassa olevan paineen muodolla on myös vaikutusta tilanteeseen. Sideputkeen aiheutuvaan rasituksen muotoon vaikuttaa, se onko kanavan sisällä yli- vai alipainetta. Ylipaine aiheuttaa sidetankoon vetojännitystä ja alipaine aiheuttaa puristusta. Kun sideputkeen aiheutuu puristusta, on tärkeä selvittää, miten paljon tanko kestää nurjahtamatta.

3.3.1 Sideputken vaikutus jäykisteeseen

Ensiksi on tärkeä selvittää, miten sideputki vaikuttaa kanavan jäykisteen rasitukseen. Jotta tämä saataisiin ratkaistua, ajatellaan, että käytettäviä sidetankoja on yksi ja se sijaitsee kanavan keskellä. Kuitenkaan tällaiselle tapaukselle ei ole suoria kaavoja Lujuusopin perusteet -kirjassa, joten on sovellettava superpositioperiaatetta (yhteenlaskuperiaate).



KUVIO 11. Tukivoima jäykästi tuetun palkin keskellä

Aiemmin jäykisteiden mitoittamista tarkastaessa sovittiin, että jäykiste on kummastakin päästä jäykästi kiinnitetty. Kun lisätään tähän tapaukseen sidetanko, voidaan tarkastella tapausta niin, että sidetanko aiheuttaa voiman F_{tuki} palkin keskelle. Tapaus on esitettyä kuviossa 11. Tällaiselle tapaukselle saadaan kaava Lujuusopin perusteet -kirjasta, jossa se vastaa tapausta 34 (Outinen, Salmi, Vulli 2007, 451). Kyseisen tapauksen maksimitaipuman v_{side} kaava on

$$v_{side} = \frac{F_{tuki}L^3}{192EI}, \quad (3.18)$$

jossa pituus L ja materiaalitiedot E ja I ovat samoja kuin jäykisteiden mitoittamisessa. Kun kaava 3.7 yhdistetään kaavan 3.18 kanssa, voidaan selvittää, paljonko voima F_{tuki} vaikuttaa kyseisessä palkissa. Kun kaavat asetetaan yhtä suuriksi, saadaan kaava

$$\frac{q_0 L^4}{384 E I} = \frac{F_{tuki} L^3}{192 E I}. \quad (3.19)$$

Kyseisestä kaavasta supistamalla saadaan lopulta kaava

$$F = \frac{1}{2} q_0, \quad (3.20)$$

josta käy ilmi, että sideputken vaikutus on puolet kokonaisvoimasta. Nyt voidaan ajatella, että sideputki puolittaa jäykisteeseen aiheutuvan momentin ja tässä tapauksessa myös rasitus puolittuu. Kun on tiedossa, miten paljon on sidetangon vaikutus, on myös helpompi mitoittaa siihen aiheutuvia kuormia ja rasituksia.

3.3.2 Sideputken kestävyys

Sideputkien kestävyyttä on tarkasteltu EN SFS 1993-1-1 kohdan 6.3. mukaan.

Sideputkina käytetään yleisesti ohutseinäistä putkea ja sellaisen ala A saadaan selvitettyä kaavalla

$$A = \frac{\pi(D_1^2 d_1^2)}{4}, \quad (3.21)$$

jossa D_1 on putken sisähalkaisija ja d_1 on sisähalkaisija. Samalla on tarpeen selvittää myös käytettävän putken neliömomentti I_y kaavalla

$$I_y = \frac{\pi(D_1^4 d_1^4)}{64}. \quad (3.22)$$

Kun ajatellaan, että sideputki on kiinnitetty kummastakin päistä nivelillä ja sen pituus on L_n , voidaan voima F_n , joka aiheuttaa nurjahduksen, laskea Tekniikan taulukkokirjan antamalla kaavalla

$$F_n = \frac{\pi^2 EI_y}{L_n^2}. \quad (3.23)$$

Kaavasta saatua arvoa verrataan sideputkeen kohdistuvaan voimaan. Jos kohdistuva voima on suurempi, on käytettävä suurempia putkia.

Kun voima F on tiedossa, voidaan selvittää, minkäsuuruisen jännityksen σ_s siitä aiheutuu sideputkelle. Jännitys voidaan selvittää kaavalla

$$\sigma_s = \frac{F}{A}. \quad (3.24)$$

Jännityksen avulla voidaan vertailla, kestääkö kyseessä oleva materiaali siihen aiheutuvan rasituksen. Vertailu tapahtuu vertaamalla sallittua jännitystä ja sidetankoon aiheutuvaa jännitystä toisiinsa, jos sideputken jännitys on pienempi, voidaan ajatella että sidetanko kestää rasituksen. Sama tarkastelu on oleellista tehdä myös nurjahdustapauksessa. Kaavalla voidaan myös selvittää mikä on maksimivoima jonka sideputki kestää.

3.4 Kanavan nostokorvakkeen mitoittaminen

Nostokorvake voidaan mitoittaa esimerkiksi kahdella eri tavalla, jotka ovat nostokorvakkeen ainevahvuuden mukaan mitoitus tai mitoitetaan nostokorvakkeelle ainevahvuus t kun geometria on tiedossa. Kummallekin tavalle antaa SFS EN 1993-1-8 ohjeet.

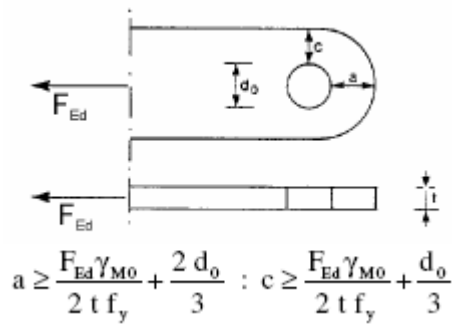
Tässä tapauksessa mitoitus tehdään jo olemassa olevan ainevahvuuden mukaan. Kuvassa 12 on esiteltynä esimerkkikuvana nostokorvakosta ja kuvassa näkyvät myös kaikki tärkeät mitat joita mitoittamiseen tarvitaan. Mitoitus on syytä aloittaa määrittämällä kuorma F_{ed} , tai jos on kyseessä jo olemassa oleva korvakko, voidaan kaavalla myös määrittää korvakon kestävä maksimivoima. (SFS-EN 1993-1-8 2005, 39).

Nostokorvakon tapin reunan etäisyys nostokorvakon reunasta, eli mitta a voidaan selvittää kaavalla

$$a \geq \frac{F_{ed} Y_{M0}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3}, \quad (3.25)$$

jossa d_0 on tapin reiän halkaisija, γ_{M0} on varmuusluku ja f_y on käytettävän materiaalin myötöraja (SFS- EN 1993-1-1 2005, 48). Mitta c voidaan selvittää kaavalla

$$a \geq \frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{2tf_y} + \frac{d_0}{3} \quad (\text{SFS-EN 1993-1-8:2005 39}). \quad (\text{kaava 3.26})$$



Kuva 12. Standardin asettamat vaatimukset (SFS EN 1993-1-8 2005, 39)

4 YMPYRÄKANAVAN MITOITTAMINEN

4.1 Kanavalevy

Koska ympyräkanavat kestävät huomattavia määriä ylipainetta, voidaan tässä tapauksessa mitoitus tehdä pelkästään alipaineen tarkastelulla. Näin tarkastelu myös pätee ylipaineella ja muutenkin jäykistämistä joudutaan tekemään myös muista syistä kuin pelkästään siihen vaikuttavasti paineista. Näitä syitä ovat esimerkiksi kuljetukselliset asiat ja kannakkeiden sijoittelu. Samalla myös jäykisteiden sijoittelu vaikuttaa huomattavasti miten helppo kanavia on asentaa ja käsitellä työkohteissa.

Kun kanavan sisällä vaikuttaa alipainetta, on ensin määritettävä kuorelle vähimmäispaksuus e ja tämän arvolla on mahdollista määrittää miten suurta alipainetta se kestää. Ensin on määritettävä paine p_y , jolla tarkoitetaan painetta, jolla keskimääräinen kehänsuuntainen jännitys saavuttaa lieriömäisessä vaipassa jäykisteiden puolivälissä materiaalin myötörajan S . Tämä saadaan laskettua kaavalla

$$p_y = \frac{S \cdot e}{R_m}, \quad (4.1)$$

jossa R_m tarkoittaa ympyräkanavan keskimääräistä sädettä. Kyseisestä kaavasta saatua arvoa verrataan paineeseen p_m , jolla tarkoitetaan teoreettista kimmoista lommahduspainetta kun on kyseessä täsmälleen lieriömäinen kuori. Tämä voidaan määrittää kaavalla

$$p_m = \frac{E \cdot e \cdot \varepsilon}{R_m}, \quad (4.2)$$

jossa ε on keskimääräinen kimmoisen kehänsuuntainen muodonmuutos lommahduksessa. Se voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \left(\frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{e^2}{12 \cdot R_m^2 (1 - \nu^2)} (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right), \quad (4.3)$$

jossa n_{cyl} on kokonaisluku, joka on alle 2 ja minimoi paineen p_m . Lauseessa oleva putken taivutus vastus Z saadaan määritettyä lausekkeella

$$Z = \frac{\pi R_m}{L}, \quad (4.4)$$

jossa L on putken jäykistämätön pituus. Kun p_m ja p_y on saatu määritetty, niitä verrataan SFS EN 13480-3+A1 antamaan taulukkoon 2.

Taulukko antaa arvon p_r / p_y , josta voidaan selvittää laskettu alempi lommahduspaine p_r , jonka on oltava suurempi kuin sallittu suunnittelupaine. Jos lommahduspaine ei täytä ehtoa on harkittava jäykisteiden välimatkan pienentämistä tai kanavan seinämävahvuuden suurentamista.

TAULUKKO 2. Lieriömäiset suorat putket ja supistuskappaleet (SFS EN 13480-3 2002, 188)

p_m / p_y	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
p_r / p_y	0	0,1245	0,2505	0,375	0,4995	0,6045	0,6795	0,72
p_m / p_y	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	
p_r / p_y	0,7545	0,78	0,8025	0,822	0,8355	0,849	0,861	
p_m / p_y	3,75	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	
p_r / p_y	0,87	0,879	0,8865	0,8955	0,9045	0,9135	0,9165	
p_m / p_y	5,5	5,75	6,0	6,25	6,5	6,75	7,0	tai suurempi
p_r / p_y	0,9225	0,9285	0,9345	0,9405	0,9465	0,9525	0,9585	

4.2 Jäykisteet

Kun on kyseessä ympyräkanavia joissa on jäykisteitä, on myös tutkittava niiden kokonaislommahdusta. Näin voidaan selvittää miten jäykisteet kestävät kanavassa olevaa alipainetta. Ensin on laskettava teoreettinen kimmoinen lommahduspaine p_n jäykistetyssä lieriössä, se voidaan laskea kaavalla

$$p_n = \frac{3}{R_m^3 L} EI_c, \quad (4.5)$$

jossa l_c on jäykisteen ja kanavalevyn yhteisprofiilin jäyhyysmomentti. Paineen p_n on oltava suurempi kuin käytettävässä oleva sallittu suunnittelupaine, jos tämä ehto ei toteudu on esimerkiksi käytettävä vankempia jäykisteitä. Seuraavaksi on määritettävä paine p_{ys} , jolla aiheutuu jäykisteen kehänsuuntainen myöntäminen. Tämä voidaan laskea kaavalla

$$p_{ys} = \frac{S_s e R_f}{R_m^2 (1 - \frac{v}{2})}, \quad (4.6)$$

jossa S_s on jäykisteen myötöraja ja R_f on säde jäykisteen kauimpaan pisteeseen. Paineen avulla voidaan selvittää suurin jäykisteeseen vaikuttava jännitys σ_s , joka saadaan kaavalla

$$\sigma_s = \frac{k k_s S_s p}{p_{ys}} + \frac{E \delta (2^2 - 1) 0,005 k k_s p}{R_m (p_n - k k_s p)}, \quad (4.7)$$

jossa k on käytetty varmuuskerroin, k_s on varmuuskerroin riippuen jäykisteiden materiaalista. Kaavassa oleva kerroin δ on maksimiarvo kaavasta

$$\delta = \left\{ \lambda (R_m - R_f) - X_c + \frac{e}{2} \right\}, \quad (4.8)$$

jossa λ riippuu onko jäykiste sisäpuolella (1), vai ulkopuolella (-1). Kerroin X_c saadaan laskettua kaavalla

$$X_c = \frac{e^2 L}{2} + \frac{A_s}{A_e} \left[\frac{e}{2} + \lambda (R_m - R_s) \right], \quad (4.9)$$

jossa A_s on jäykisteen ala ja A_e on yhdistelmäprofiilin pinta-ala. Kaavojen avulla saatua jännitystä verrataan sallittuun jännitykseen ja jos jännitys ylittää sallitun arvon on rakenteeseen tehtävä muutoksia.

Koska ympyräkanavissa yleisesti käytetään lattatankojäykisteitä, on niiden sivuttaisen stabiilius tarkastettava. Ensin verrataan jäykisteen säteittäistä korkeutta h_s , joka sijaitsee laippojen välissä termin R_m arvoon. Näiden suhteen ja n_{cyl} arvon avulla katsotaan taulukosta 3 oikea arvo. Taulukon arvo on yhtä suuri kuin lauseke

$$\left(\frac{\sigma_i}{E} \right) \left(\frac{h_s}{e_w} \right)^2, \quad (4.10)$$

jossa e_w on lattajäykisteen paksuus. Lausekkeesta ratkaistaan lommahdusjännitys σ_i , jossa sivuttainen kiepahdus tapahtuu. Kyseisen arvo on oltava suurempi kuin kaavalla,

$$\frac{4pS_s}{p_{ys}}, \quad (4.11)$$

saatava arvo. Näiden lausekkeiden avulla on mahdollista mitoittaa jäykiste kestämään käytettävissä olevaan suunnittelupainetta.

TAULUKKO 3. Lattajäykisteen stabiilius (SFS EN 13480-3 2006, 198)

h_s / R_m	0,01	0,011	0,012	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,045
n_{cyl}									
2	0,012	0,0132	0,0144	0,0180	0,0241	0,0303	0,0366	0,0492	0,0557
3	0,0257	0,0284	0,0311	0,0374	0,0537	0,0687	0,0846	0,119	0,138
4	0,0466	0,0517	0,0570	0,0734	0,103	0,137	0,175	0,268	0,326
5	0,0768	0,860	0,0955	0,126	0,187	0,263	0,361	0,679	0,965
6	0,120	0,136	0,153	0,211	0,340	0,537	0,881	1,44 ^a	
7	0,183	0,211	0,242	0,356	0,677	1,48 ^a			
8	0,279	0,331	0,390	0,648	1,92 ^a				
9	0,438	0,541	0,676	1,49 ^a					
10	0,736	0,998	1,420 ^a						
11	1,490 ^a								
h_s / R_m	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
n_{cyl}									
2	0,0622	0,0755	0,103	0,133	0,164	0,198	0,236	0,277	0,324
3	0,157	0,201	0,310	0,462	0,695	1,10	1,99 ^a		
4	0,395	0,581	1,44 ^a						
5	1,46 ^a								

^a Nämä arvot ovat väliarvojen interpolointia varten

HUOM. 1 Lausekkeen h_s / R_m taulukkoarvojen välisille arvoille käytetään logaritmistä interpolointia.

HUOM. 2 Koska termin $(\sigma_i / E_t)(h_s / e_w)^2$ suurin mahdollinen arvo on 1,14, ei tulisi ekstrapoloida tuon arvon yli.

HUOM. 3 Lommahtamista ei voi tapahtua, jos $n > 10$ ja $h_s / R_m > 0,01$ ulkoisen paineen vaikuttaessa.

5 TYÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyön alussa tutustuttiin esiselvitykseen ja jonka pohjalta päätettiin mihin työssä on otettava kantaa ja tehtiin karkea suunnitelma ohjeiden sisällöstä. Tämän jälkeen haastateltiin suunnittelijoita, joiden mielipiteiden mukaan alettiin rakentaa ohjeille vaatimusluetteloa. Vaatimusluettelo pohjautui suurimmaksi osaksi esiselvityksen aikana saatuihin tietoihin ja siihen, mitä muutoksia vanhoihin ohjeisiin tulisi tehdä ja mitä säilyttää. Vaatimusluetteloon kerättyjen tietojen mukaan tutustuttiin materiaaleihin, eli Eurocode-standardeihin ja muihin rakenteen mitoittamiseen liittyviin lähteisiin.

Seuraavaksi tutustuttiin kanavien mitoittamista koskeviin asioihin. Ensin oli selvitettävä, miten kanavalevy vaikuttaa ja miten sen mitoittamiseen tulisi ottaa kantaa ohjeissa. Standardeihin tutustuttua kävi selväksi, että helpoin tapa oli määrittää aluksi jokin paksuus kanavalevyille ja sen avulla aloittaa mitoittaminen. Kanavalevyn paksuuden määrittämisen jälkeen siirryttiin jäykisteiden mitoittamiseen. Jäykisteiden mitoittamisesta oli helppo tehdä alustavaa luonnosta Excel - ohjelmasta, johon työn edetessä lisättäisiin uusia ominaisuuksia.

Jäykisteiden mitoittamisen jälkeen oli vielä selvitettävä mitä muita asioita kanavalevyn vaikuttaa kuin pelkkä jäykisteiden kestävyys. Näitä olivat kanavalevyn mittoihin vaikuttavat tekijät. Eli kanavalevyn levypintoja oli rajoitettava ja jotka näin pystyttiin määrittämään maksimijäykistevälejä ja samalla varmistamaan, että levypinnat kestivät niihin kohdistuvat rasitukset.

Koska kanavien mittojen kasvaessa suuriksi on yleistä, että käytetään kanavan sisäisiä sideputkia, oli myös tarpeen määrittää, miten ne vaikuttavat jäykisteeseen. Ensin oli selvitettävä, minkälaisia putkia oli yleisesti käytössä ja miten ne sijoiteltiin. Kun oli selvitetty, miten putket oli sijoiteltuna kanaviin, oli mahdollista tehdä laskelmia niiden vaikutuksesta kanaviin ja varsinkin jäykisteiden kestävyyyksiin.

Koska kanavia joudutaan kannattelemaan, oli selvitettävä, minkälaisia kannakkeita on käytössä ja mitä niiden sijoittelussa tulisi ottaa huomioon. Rakenteiden kestävyysden lisäksi oli huomioitava, ettei kannakkeille aiheudu liian suuria kuormia.

Koska työn alussa oli määritetty, että ohjeiden tulisi koskea myös ympyränmuotoisia kanavia, joten oli tutustuttava myös niitä koskeviin laskelmiin. Ympyränmuotoiset ka-

navat eivät olleet yhtä suoraviivaisia kuin suorakaiteen muotoiset, joten niihin oli etsittävä tietoa useasta eri lähteestä. Selkeimmäksi laskelmien lähtökohdaksi huomattiin metallisille teollisuusputkistoille tarkoitettu standardi. Sen mukaan pystyttiin mitoittamaan niin jäykisteväli kuin jäykisteen kestävyys. Oli kuitenkin otettava huomioon, ettei ympyränmuotoisissa kanavissa ongelmaksi aina muodostu jäykisteiden kestävyys, vaan on otettava huomioon myös kannakkeiden sijoittelu.

Kun tarpeelliset laskelmat oli tehty, oli aika selvittää, minkälainen tulisi olla lopullisten ohjeiden muoto. Ensin laadittiin ehdotusluonnos, joka lähetettiin suunnittelijoille kommentoitavaksi ja arvosteltavaksi. Suunnittelijoiden kommenttien mukaan tehtiin luonnokseen muutoksia ja jonka pohjalta lopullinen ohje alkoi saada muotoaan. Seuraavaksi tuli siirtää lopulliset laskelmat ohjeeseen ja tarkastella ohjeiden käyttöliittymää. Käyttöliittymän muoto muuttui työn loppuvaiheessa useaan otteeseen ja ohjeet tehtiin selkeämmiksi, jotta niiden muokkaus onnistui mahdollisimman helposti.

Kun ohjeet oli saatu haluttuun muotoon, niistä tehtiin vielä englanninkielinen versio. Tämä oli tehtävä, koska konsernin kieli on englanti ja ohjeet haluttiin käyttöön koko konsernin alueelle. Lopulliset suomenkieliset ohjeet on esitettyinä liitteessä 2.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli saada aikaan soodakattilan ilma- ja savukanavien suunnitteluun standardit täyttävä ohje. Työn tuloksena saatiin aikaiseksi Microsoft Excel -ohjelmalla tehty kanavasuunnittelun ohje. Ohjeen avulla suunnittelija voi suunnitella kanavalle jäykisteprofiilin, jäykistevälin ja sideputkien käytön. Samalla ohje antaa suunnittelijalle tietoa siitä mikä on kanavalevyn, jäykisteen ja sideputkien kestävyys. Näiden arvojen mukaan suunnittelija voi tehdä kanavan jäykistämisestä mahdollisimman taloudellista.

Ohjeet tehtiin mahdollisimman yksinkertaisiksi, ja tarkoituksena oli, että suunnittelijalle näkyvissä ovat vain ne tiedot, jotka häntä koskevat. Laskutoimitukset eivät ole suoraan näkyvillä ohjelman valintasivulla, mutta niitä on mahdollista tutkia, jos suunnittelija haluaa nähdä, miten valinnat muodostuvat. Näkyvillä lukuarvoina ovat ainoastaan kanavan käyttöasteet ja kanavarakenteen paino.

Suunnittelija aloittaa kanavan laskennan määrittämällä maakohtaisen standardin, jonka mukaan käytettävät materiaalit määräytyvät. Tämän jälkeen määritetään kanavan olosuhteet eli lämpötilat ja paineet. Kanavan tiedoissa voidaan määrittää kanavan muoto eli se, onko kyseessä suorakaiteen vai ympyrän muotoinen kanava, jolle annetaan sitten kyseessä olevan kanavan mitat. Näiden mittojen mukaan ohjelma suosittelee jäykisteväliä ja jäykisteprofiilia. Suunnittelija voi määrittää myös toisen profiilin ja säätää jäykisteväliä muiden tietojen mukaan sopivaksi. Myös sidetangon käyttö voidaan määrittää tässä kohdassa. Lopuksi ohjelma antaa tiedon kanavan ja rakenteen käyttöasteesta. Kanavan tiedot voidaan tallentaa taulukkoon ja siirtyä seuraavaan kanavan osaan.

Lopputyö alussa oli perehdyttävä soodakattilan rakenteeseen ja energiatekniikkaan. Ennen työn aloittamista olin jo päässyt tutustumaan aiheeseen esiselvityksen merkeissä, josta oli erityisesti apua työtä ajatellen. Työn aikana tutuiksi tulivat niin soodakattilan rakenne kuin sen toimintaperiaate.

Soodakattilan lisäksi oli perehdyttävä Eurocode-standardeihin. Standardit tuntuivat aluksi hieman monimutkaisilta ja huomasi, että eri standardeissa oli hyvin paljon eroja eivätkä ne olleet aina yhdenmukaisia. Näiden erojen vuoksi tietojen etsiminen

tuntui aluksi vaikealta. Kuitenkin työn edetessä standardeihin tottui ja niitä oppi käyttämään haluamallaan tavalla.

Työn tavoitteena oli saada aikaiseksi toimiva ja yksinkertainen ilma- ja savukanavien suunnitteluohje. Uskon, että ohjelma toimii tilaajan toivomalla tavalla ja sen käyttö on myös tarpeeksi yksinkertaista. Ohje olisi luultavasti voinut olla laajempikin, mutta se vastasi asetettuja tavoitteita. Vaikka ohjeen sisältö muuttui hieman työn aikana, siitä tuli kuitenkin sovittu kokonaisuus. Ohjetta on myös testattu alustavasti ja sen avulla saatuihin laskelmiin on oltu tyytyväisiä.

Opinnäytetyön tekemisestä on ollut varmasti hyötyä. Energiatekniikka vaati paljon perehtymistä ja opinnäytetyötäni tehdessä tietoni energiatekniikasta ja painelaitteista karttuivat huomattavasti. Opinnäytetyöni ansiosta koen, että minulla on hyvä pohja jatkaa energiatekniikan ja painelaitteiden parissa työskentelyä. Työhön kuuluva lujuslaskenta antoi myös hyvää kokemusta erilaisten rakenteiden analysoinnista.

Saatuun ohjeeseen on helppo lisätä uusia ominaisuuksia ja sen muokkaaminenkin on pyritty tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi. Esimerkiksi materiaalien lisääminen onnistuu hyvin helposti ja myös erilaisia jäykisteprofiileja on mahdollista lisätä.

Jatkotoimenpiteinä on luultavasti ympyräkanavien mitoituksen kehittäminen ja useamman sideputken käyttömahdollisuus kanavissa. Opinnäytetyön lopussa tarkasteltiin lisäksi mahdollisuutta, voisiko ohjetta käyttää voimakattiloissa, mutta ohje ei vielä täyttänyt ihan kaikkia vaatimuksia. Niinpä jatkossa voi olla että, ohjetta muokataan niin, että se toimii myös voimakattiloissa. Mutta vasta kun ohje on oikeassa käytössä, on mahdollista tehdä päätelmiä muutoksista ja tehtävistä lisäyksistä.

LÄHTEET

Alapuranen, S, 2008. Pohto/Soodakattilan peruskurssi 13.2.2008. Soodakattilavirtaukset apulaitteineen. Andritz Oy.

Andritz Oy. Yrityksen www-sivut, Konserni [viitattu 2.4.2012] Saatavissa: <http://www.andritz.com>.

Asce. 1995. *The Structural design of air and gas ducts for power stations and industrial boiler application*. USA: Asce Publications.

Biermann, C., J. ,1996. *Handbook of Pulping and Papermaking (2nd Edition)*. Elsevier.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S., 2008. *Voimalaitostekniikka*. Keuruu: Opetushallitus.

Hänninen, E., 2011. Andritziin perehdytysopas. 14.7.2011. Andritz Oy. [Sisäinen tiedote]

Nostoapuvälineet Turvallisuus [verkkodokumentti] 2008 [viitattu 7.2.2012]. Tampere: Työsuojeluhallinto. Saatavissa: http://tyosuojelujulkaisut.wshop.fi/documents/2011/01/TSO_12.pdf

Outinen, H., Salmi, T., Vulli, P., 2007. *Lujuusopin perusteet*. Tampere: Pressus Oy.

Savonia, LEKA-hanke esite [verkkodokumentti] 2011 [viitattu 20.03.2012] Saatavissa: http://leka.savonia.fi/images/esitteet/SAVONIA_leka-esite_2011_2.pdf

SFS- EN 1993-1-1 2005 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS EN 1993-1-5 2006 Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-8 2005 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS 5361 2007 Putkiston kannatus. Kannakestandardien käyttö. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS EN 13445-3 2009 Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 3: Suunnittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN 13480-3 + A1, 2006, Metalliset teollisuusputkistot. Osa 3: Suunnittelu ja las-
kenta. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

Valtanen, E., 2012. *Tekniikan taulukkirja*. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

Young, W., C., Budynas, R., G., 2002. *Roarks's Formulas for stress and strain*. New
York: McGraw-Hill.

Rectangular plates under uniform load producing large deflection

a/b	Edges and point of max σ	Coef.	qb^4/Et^4											
			0	12.5	25	50	75	100	125	150	175	200	250	
1	Held, not fixed	y/t	0	0.430	0.650	0.930	1.13	1.26	1.37	1.47	1.56	1.63	1.77	
	At center of plate	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	0.70	1.60	3.00	4.00	5.00	6.10	7.00	7.95	8.60	10.20	
1	Held and riveted	y/t	0	0.406	0.600	0.840	1.00	1.13	1.23	1.31	1.40	1.46	1.58	
	At center of plate	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	0.609	1.380	2.68	3.80	4.78	5.75	6.54	7.55	8.10	9.53	
1	Held and fixed	y/t	0	0.165	0.32	0.59	0.80	0.95	1.08	1.19	1.28	1.38	1.54	
	At center of long edges	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	0.070	0.22	0.75	1.35	2.00	2.70	3.30	4.00	4.60	5.90	
1.5	At center of plate	y/t	0	0.075	0.30	0.95	1.65	2.40	3.10	3.80	4.50	5.20	6.50	
	Held, not fixed	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	1.80	3.50	6.60	9.20	11.60	13.0	14.50	15.80	17.10	19.40	
2	At center of plate	y/t	0	0.625	0.879	1.18	1.37	1.53	1.68	1.77	1.88	1.96	2.12	
	Held, not fixed	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	1.06	2.11	3.78	5.18	6.41	7.65	8.60	9.55	10.60	12.30	
2 to ∞	At center of plate	y/t	0	0.696	0.946	1.24	1.44	1.60	1.72	1.84	1.94	2.03	2.20	
	Held, not fixed	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	1.29	2.40	4.15	5.61	6.91	8.10	9.21	10.10	10.90	12.20	
1.5 to ∞	At center of long edges	y/t	0	4.87	7.16	10.30	12.60	14.60	16.40	18.00	19.40	20.90	23.60	
	Held and fixed	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	0.28	0.51	0.825	1.07	1.24	1.40	1.50	1.63	1.72	1.86	
∞	At center of long edges	y/t	0	0.20	0.66	1.90	3.20	4.35	5.40	6.50	7.50	8.50	10.30	
	Held and fixed	$\frac{\sigma_d b^2/Et^2}{\sigma b^2/Et^2}$	0	5.75	11.12	20.30	27.8	35.0	41.0	47.0	52.50	57.60	67.00	

(Young & Budynas 2002, 452.)

KANAVAN LASKENTA

Projekti nimi
 Projektnumero numero
 Päivämäärä pö. kk. vuosi
 Tekijä jh

Kanavalevyn materiaalitiedot:

Standardi EN
 Materiaali S 235

Valitse Muokattainen standardi
 Valitse kanavan materiaali

Olosuhted tiedot

☐ Sijainti mukaan

☒ Osa valitta

Sijainti
 Yläpaine kPa
 Alipaine kPa
 Lämpötila C

Paine kPa
 Lämpötila C

Kanavantiedot

☒ Suorakaidekanava

☐ Ympyräkanava

Leveys mm
 Korkeus mm
 Paksuus

Halkaisija mm
 Paksuus

Valitse olosuhteet valikosta tai aseta arvot

Määritä paine
 Määritä lämpötila (max 400)

Valitse kanavan muoto
 Määritä kanavan leveys (sisämitat)
 Määritä kanavan korkeus (sisämitat)
 Valitse kanavien seinämäpaksuus

Jäykisteen tiedot

Materiaali S 235
 Jäykistessuuntaus
 Profiili
 Jäykisteväli mm
 Etäisyys mm

Materiaali (jäykisteväli)
 Määrä (jäykisteväli)

Kanavalevyn kestävyys
 Kyllä / Ei
 Kyllä

Jäykisteen kestävyys
 Kyllä / Ei
 Kyllä

Kanavan käyttöaste

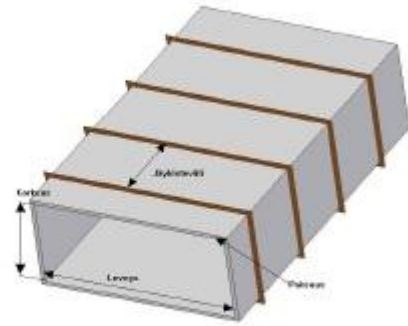
Kanavan ja jäykisteiden paino 5m kanavassa kg

Projektin kanavat ja kanavien jäykisteiden tiedot

Kohde	kanava mitat	sidetanko	jäykiste	materiaali	jäykisteväli	k.s.
	mm	mm			mm	jyäk.

Nämä kohdat ovat projektissa käytettävissä kanavien väden

Suorakaidekanava



Ympyräkanava



